

ТӨМЕН КӨМІРТЕКТІ ФЕРРОХРОМ ӨНДІРУ ПРОЦЕСТЕРІН ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ БАҒАЛАУ

ЖУМАГАЛИЕВ Е.У.*^{ID}, ШАБАНОВ Е.Ж.^{ID}, РАХМЕТОВ Б.М.^{ID}, ОРЫНБАЕВ Б.М.^{ID}

*Жумағалиев Ерлан Уланович - Техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан.

E-mail: yzhumagaliyev@zhubanov.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2227-0661>

Шабанов Ербол Жақсылықұлы - PhD, қауымдастырылған профессор, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан.

E-mail: yshabanov@zhubanov.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6902-1211>

Рахметов Бекжан Маратұлы - Магистрант, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан.

E-mail: jocular_91@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-4376-3152>

Орынбаев Бауыржан Мұнарбайұлы - Магистр, аға ғылыми қызметкер, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан.

E-mail: bauka929292@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7730-9060>

Андатпа. Төмен көміртекті және орта көміртекті феррохром өндірісі металлургия саласы үшін стратегиялық маңызы зор бағыт болып табылады. Бұл үрдіс экологиялық талаптардың күшеюі және сапалы легирлеуші материалдарға сұраныстың артуынан болып табылады. Төмен көміртекті феррохром өндірісі автомобиль, аэроғарыш және құрылыста қолданылатын берік және жеңіл қорытпаларды алуға мүмкіндік береді. Мұндай жеңіл материалдарды пайдалану кезінде, әсіресе көлік пен авиацияда энергия шығынын азайтады. Қазіргі уақытта отандық кәсіпорын жылына шамамен 60 000 тонна өнім өндіреді, алайда өндірістік қуатты арттыру және технологиялық шешімдерді жетілдіру әлеуеті сақталуда. Сонымен қатар, құрамында алтывалентті хром бар қождың түзілу мәселесі ерекше өзектілікке ие, себебі ол экологиялық қауіп төндіреді.

Осы зерттеу төменкөміртекті феррохромның болашақ өндірістік кешені үшін жылдық өнімін ұлғайтуға бағытталған оңтайлы технологияны іздеуге арналған. Жұмыста энергия тиімді және ресурсты үнемдейтін заманауи балқыту әдістері, алтывалентті хромның түзілуін азайту жолдары, сондай-ақ қожды қайта өңдеу және залалсыздандыру технологиялары қарастырылады. Ұсынылған шешімдерді іске асыру өндіріс өнімділігін арттыруға, экологиялық жүктемені төмендетуге және кәсіпорынның тұрақты дамуын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: ферроқорытпа өндірісі, төмен көміртекті феррохром, технологиялық сұлбалар, қож, экологиялық жүктеме.

Кіріспе

Болат өндіру барысында оның қасиеттерін жақсарту мақсатында әртүрлі ферроқорытпалар кеңінен қолданылады [1]. Өнеркәсіпте дәстүрлі түрде қоспа элементтер темір негізіндегі қорытпалар түрінде енгізіліп, құрамындағы темірдің көп болуына байланысты ферроқорытпалар деп аталды. Болат өндіру технологиясының дамуына байланысты бұл ұғым кеңейіп, қазіргі таңда құрамында темірі жоқ қоспа-қорытпалар да қолданыла бастады [2]. Соған қарамастан, хром, марганец және кремний негізіндегі ферроқорытпалар болат өндірісінде әлі де ең көп пайдаланылатын материалдар болып табылады.

Феррохром - құрамында әдетте 50-70% хром бар темір-хром қорытпасы, негізінен көміртегінің мөлшеріне қарай жіктеледі, бұл оның маркасы мен қолданылу саласын айқындайды. Осыған сәйкес феррохром жоғары көміртекті (4-9% C), орташа көміртекті (0,5-4% C) және төмен көміртекті (0,5%-дан төмен C) деп бөлінеді [3].

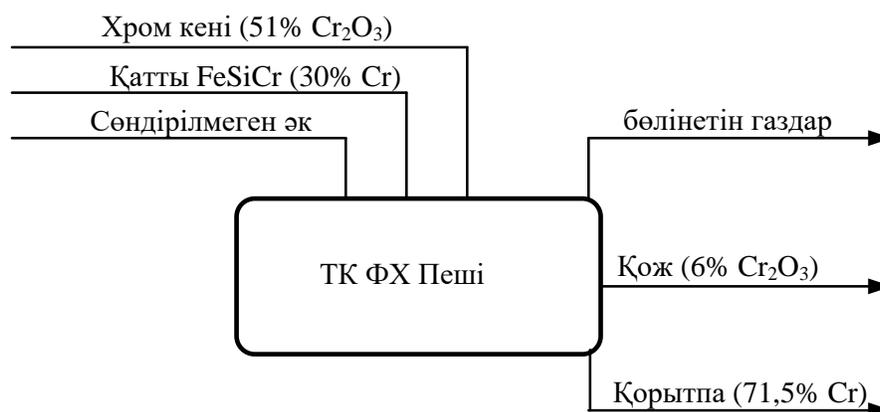
Төмен көміртекті және орташа көміртекті феррохром өндірісі металлургиялық кешеннің тұрақты сұранысына және өнім сапасына қойылатын жоғары талаптарға негізделген ферроқорытпа өнеркәсібінің маңызды саласы болып табылады [4, 5]. Сонымен қатар, бұл өндіріс

құрамында алты валентті хром бар қождың көлемінің көп түзілуімен сипатталады, бұл экологиялық жүктемені арттырады және оларды одан әрі пайдалану мүмкіндіктерін шектейді [6, 7].

Осыған байланысты осы зерттеу нарықтың шекті сыйымдылығына сәйкес келетін төмен көміртекті феррохром өндірісінің өнімділігін арттыру мүмкіндіктерін бағалауға, сондай-ақ қождағы Cr(VI) құрамын оны тауарлық өнім ретінде шаруашылық айналымға тарту перспективасымен инертті күйге дейін төмендетуге мүмкіндік беретін технологиялық тәсілдерге әдеби шолуға бағытталған.

Бір сатылы технологиялық процесс.

Төмен көміртекті феррохромды (сапалы FeCr) алудың бірсатылы технологиясы жоғары көміртекті феррохромды алдын ала өндіруді және оны кейін декарбонизациялауды қажет етпейді. Бұл әдісте қорытпа бір ғана интеграцияланған металлургиялық кезеңде түзіледі. Процесс барысында хромиттің тотықсыздануы мен қорытпаның қалыптасуы бір мезгілде, қатаң бақыланатын жағдайларда жүзеге асады, соның нәтижесінде төмен көміртекті феррохром тікелей алынады [8]. Бұл технологиялық процестің сұлбасы 1-суретте көрсетілген.



Сурет 1 - Бір сатылы технологиялық процесс

Бұл технологияның негізгі артықшылықтары:

- Процесті басқару жеңіл, себебі барлық операциялар бір ғана технологиялық агрегатта жүзеге асырылады.

- Процесте қатты күйдегі FeSiCr қолдануға болады, ал бұл қорытпаны басқа өндірістік алаңда алдын ала дайындауға мүмкіндік береді.

- Балқытылған материалдың қозғалысы барынша азайтылады.

Сонымен қатар, технологияның кемшіліктері:

- Қожбен бірге хромның едәуір мөлшерде жоғалуы салдарынан оның алыну деңгейі төмен (шамамен 6% Cr₂O₃).

- Қож құрамында Cr⁶⁺ айтарлықтай көлемде жиналып, кейін жер асты суларына шаймалану қаупін тудырады.

- Қатты қож бен қорытпа қоспасының түзілуі электрлік режимнің тұрақсыз болуына әкеледі.

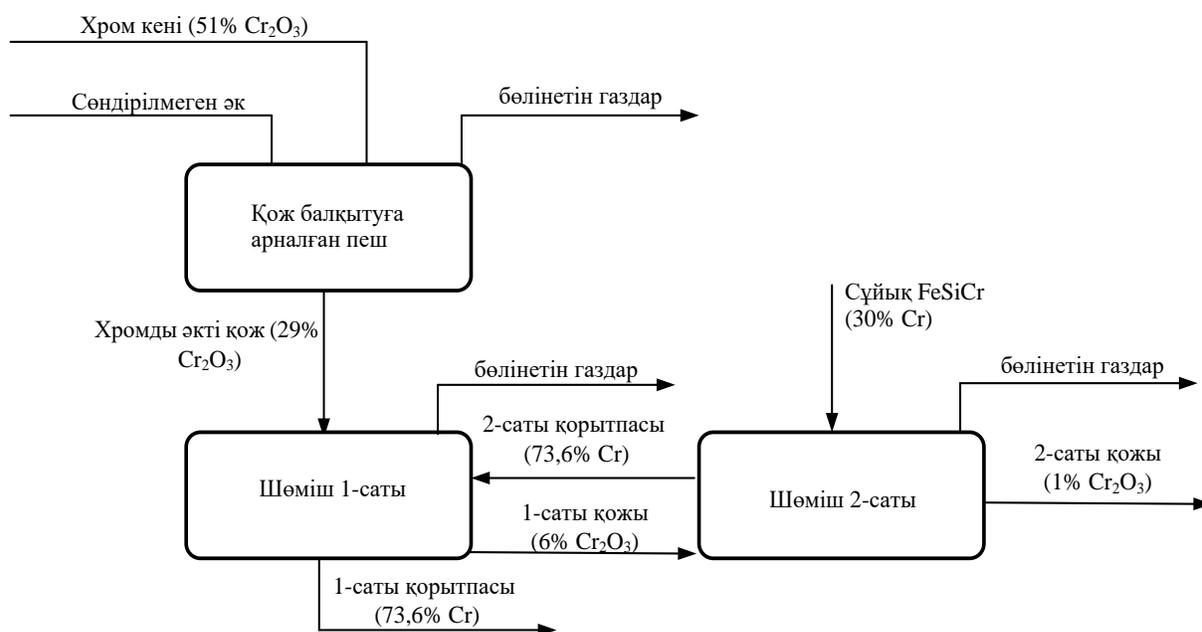
- Пеш шахтасында тотығу жүретіндіктен, кремнийдің тотықсыздану тиімділігі төмендейді.

- Пеш ішінде қорытпаның болуы және электродтардан көміртектің қорытпаға өтуіне қолайлы тотықсыздану жағдайлары салдарынан алынатын қорытпаның сапасы нашарлайды.

Перрен технологиясы.

Төмен көміртекті феррохромды өндіруде ең кеңінен қолданылатын әдіс - дәстүрлі Перрен технологиясы [9]. Бұл процесс екі пеш пен екі шөмішті пайдалануды талап етеді. Бірінші пешке

хром кені мен әк салынып, хром-әк балқымасы алынады. Ал екінші пеште кварцит, тотықсыздандырғыш және хромит шихтасын балқыту арқылы ферросиликохром (FeSiCr) қорытпасы өндіріледі. Одан кейін алынған балқымалар екі шөміште қарсы ағын (контрток) принципі бойынша араластырылып, қождағы хромды металл қорытпасына тотықсыздандыру жүзеге асырылады. Бірінші кезеңде кенді-әк қожы екінші кезеңнен алынған аралық қорытпамен әрекеттесіп, соңғы қорытпа мен аралық қож түзеді. Кейін бұл аралық қож екінші сатылы шөмішке жіберіліп, онда балқытылған FeSiCr-пен араласады да, соңғы қож бен аралық қорытпа түзіледі. Аралық қорытпа қайтадан бірінші сатылы шөмішке қайтарылады. Әрбір шөміште тотығу және тотықсыздану реакцияларының тепе-теңдігін қамтамасыз ету үшін арнайы араластыру тәсілдері қолданылады (тербелмелі араластырғыштар, дірілдетілетін шөміштер, кеуекті тығындар және т.б.). Нәтижесінде соңғы қож құрамында шамамен 1% Cr₂O₃, ал дайын қорытпада шамамен 1% кремний болады. Процестің технологиялық сұлбасы 2-суретте көрсетілген.



Сурет 2 - Перрен технологиясы

Бұл технологияның артықшылықтары төмендегідей:

- Қожбен бірге хромның аз жоғалуына байланысты оның алыну деңгейі өте жоғары (шамамен 1% Cr₂O₃).

- Пешке тек қож жүктелетіндіктен, электрлік режимнің тұрақтылығы қамтамасыз етіледі.

- Металл кремнийінің жанында доғалық разрядтың болмауы себепті кремнийді тотықсыздандыру тиімділігі жоғары.

- Қож химиялық тұрғыдан инертті болып табылады және ауылшаруашылық мақсатта сатылуы мүмкін; басқа кәсіпорындарда қождың тауарлық өнім ретінде қолдануға жарамдылығы дәлелденген. Егер инертті қожды өткізу нарығы болмаса да, оның құрамындағы алты валентті хромның қоршаған ортаға шаймаланбауы маңызды артықшылық болып саналады.

- Қож пешіндегі тотығу жағдайлары электродтардан көміртектің қорытпаға өтуін шектейді, соның нәтижесінде алынатын феррохромның сапасы жоғары болады.

Сонымен қатар, технологияның кемшіліктері:

- Хромның жоғары алынуын қамтамасыз ету үшін балқытылған FeSiCr қолдану қажет, бұл қож пешін FeSiCr пешіне (немесе ферросиликохром балқыту пешіне) жақын орналастыруды

талап етеді.

- Процесті пайдалану күрделі, себебі екі пештің жұмысын дәл синхрондау қажет.
- Балқытылған материалдардың қозғалысы едәуір көп.
- Перрен процесінде қолданылатын жоғары температура шөміштің төсемінің қазіргі технологиялармен салыстырғанда тез тозуына әкелуі мүмкін, алайда бұл кемшілік хромның жоғары шығымына қол жеткізудің өзіндік «бағасы» болып табылады

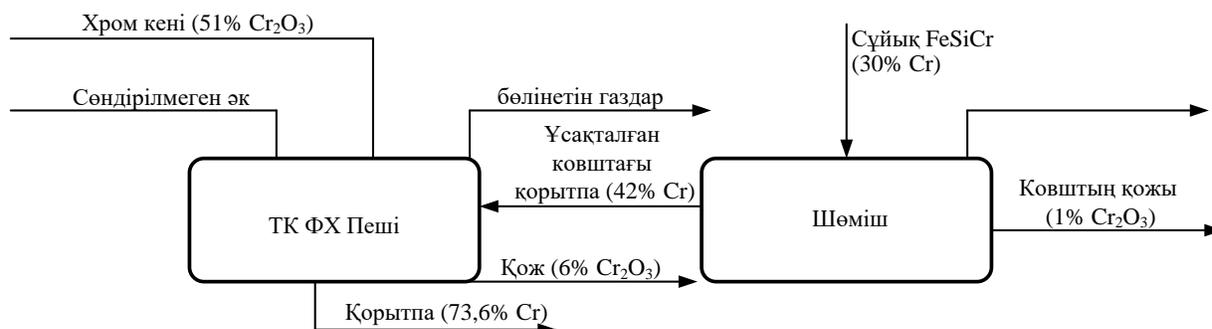
Пешке легіріленген шөмішті тасымалдаумен жүзеге асырылатын Перреннің өзгертілген процесі.

Бұл нұсқада соңғы қожды тотықсыздандыру нәтижесінде алынған аралық қорытпа басқа шөмішке ауыстырылмай, тікелей төмен көміртекті феррохром өндіретін пешке қайта жіберіледі [10].

Процесс қарсы ағын принципі бойынша жүргізіледі және екі пеш пен бір шөмішті қажет етеді. Бір пешке кварцит, тотықсыздандырғыш және хромит шихтасы салынып, ферросиликохром (FeSiCr) балқымасы алынады. Алынған FeSiCr балқымасы төмен көміртекті феррохром өндіріс пешінен аралық қож шелегіне шығарылады, онда хромиттің негізгі бөлігі тотықсызданып, соңғы қож түзіледі.

Шөміште түзілген аралық металл кейін салқындатылып, ұсақталады. Бұл ұсақталған қорытпа ұсақталған хром кені мен әк қосылып, FeSiCr балқымасымен араласу үшін төмен көміртекті феррохром өндіретін пешке беріледі. Нәтижесінде соңғы төмен көміртекті феррохром мен аралық қож алынады.

Шөміште тотығу және тотықсыздану реакцияларының тепе-теңдігін қамтамасыз ету үшін әртүрлі араластыру тәсілдерін қолдану қажет (тербелмелі араластырғыштар, дірілдетілетін шөміштер, кеуекті тығындар және т.б.). Соңғы қож құрамында шамамен 1% Cr_2O_3 , ал дайын қорытпада шамамен 0,5% Si болады. Процестің технологиялық сұлбасы 3-суретте көрсетілген.



Сурет 3 - Перреннің өзгертілген процесі

Бұл процестің артықшылықтары төмендегідей:

- Қожбен бірге хромның аз жоғалуына байланысты оның алыну деңгейі жоғары (шамамен 1% Cr_2O_3).
- Қож химиялық тұрғыдан инертті болып табылады және ауылшаруашылық мақсатта пайдалануға немесе сатуға жарамды.
- Дәстүрлі Перрен процесімен салыстырғанда балқытылған материалдардың қозғалысы едәуір аз.

Сонымен қатар, процестің кемшіліктері:

- Хромның қажетті деңгейде алынуын қамтамасыз ету үшін балқытылған FeSiCr қолдану талап етіледі, бұл қож пешін FeSiCr пешіне (немесе FeSiCr балқыту пешіне) жақын орналастыруды қажет етеді.

- Пайдалану күрделі, себебі екі пештің жұмысын дәл синхрондау қажет.
- Пеш шахтасында тотығу процесі жүретіндіктен, кремнийдің тотықсыздану тиімділігі төмендейді.
- Қатты қож бен қорытпа қоспасының түзілуі электрлік режимнің тұрақсыздығына әкеледі.
- Пеш ішінде қорытпаның болуы және электродтардан көміртектің қорытпаға өтуіне қолайлы тотықсыздану жағдайлары салдарынан алынатын қорытпаның сапасы төмендейді.

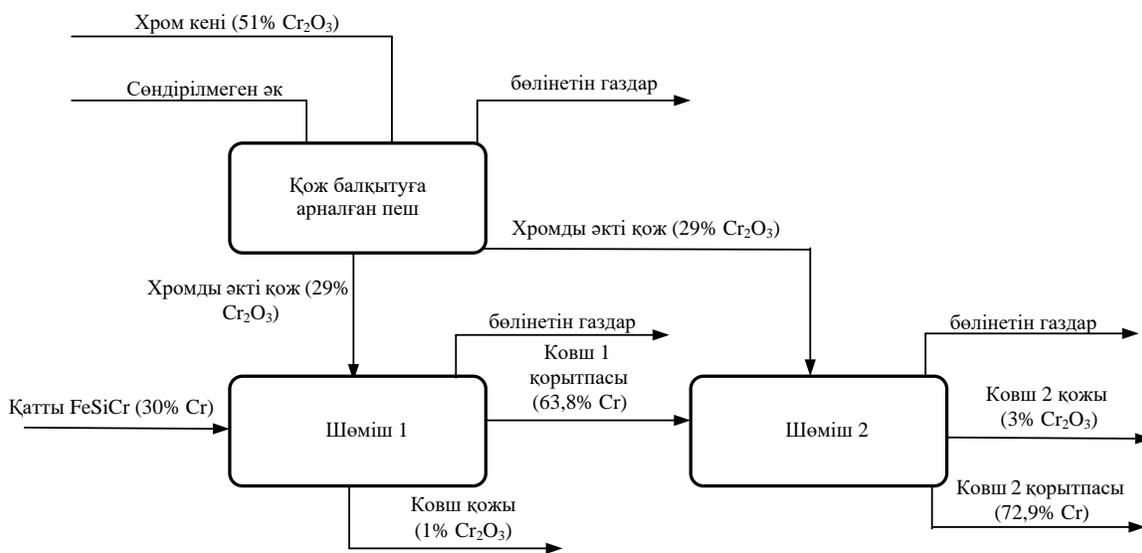
Дуплекс процесс.

Дуплекс процесс төмен көміртекті феррохром өндіруде қолданылатын технологиялардың бірі [11, 12]. Бұл процесс үшін электр пеші, шөміш және тарату шелегі қажет.

Процесс келесі сатылардан тұрады:

1. Пешке хром кені мен әк салынып, хром-әк қожының балқымасы алынады.
2. Бұл қож шөмішке түсіп, қатты FeSiCr-пен араласады, нәтижесінде қождағы хром металл қорытпасына қалпына келтіріледі.
3. Аралық қорытпаны шөміште қалдыруға мүмкіндік беретін тарату шелегі арқылы қорытпа мен қож бөледі.
4. Аралық қорытпаға қайтадан хром-әк қожы қосылып, соңғы төмен көміртекті феррохром қорытпасы және екінші үйінді қож алынады.

Шөміште тотығу және тотықсыздану реакцияларының тепе-теңдігін сақтау үшін әртүрлі араластыру тәсілдері қолданылады (тербелмелі араластырғыш, дірілдетілетін шөміш, кеуекті тығындар және т.б.). Құрамдық көрсеткіштері: Бірінші үйінді қож: шамамен 1% Cr₂O₃; Екінші үйінді қож: шамамен 3% Cr₂O₃; Соңғы металл: шамамен 1,5% Si. Процестің технологиялық схемасы 4-суретте көрсетілген.



Сурет 4 - Дуплекс процесс

Бұл процестің артықшылықтарына мыналар жатады:

- Бір сатылы экстракцияға қарағанда хромды орташа қалпына келтіру жоғары, бірақ Перрен процесіне қарағанда төмен.
- Процесс қатты FeSiCr қолданады, бұл FeSiCr-ді басқа мақсатта пайдалануға мүмкіндік береді.
- Электр пешіне тек қож құйылатындықтан жұмыс режимі тұрақты.

• Кремнийді қалпына келтіру тиімді, бірақ төмен температураға байланысты Перрен процесіне қарағанда аз.

• Процесті пайдалану жеңіл, себебі тек бір пеш қолданылады, балқытылған материалдарды синхрондаудың қажеті жоқ.

• Қож пешіндегі тотықсыздану жағдайлары көміртектің электродтардан қорытпаға түсуіне жол бермейді, нәтижесінде қорытпаның сапасы жоғары.

• Қатты FeSiCr қолдану процесті суық температурада жүргізуге мүмкіндік береді, бұл хромның қождағы мөлшерінің жоғарылауына әкеледі.

• Материалдардың балқымаларының қозғалысы айтарлықтай.

Вакуумдық пештерді қолданатын процестер.

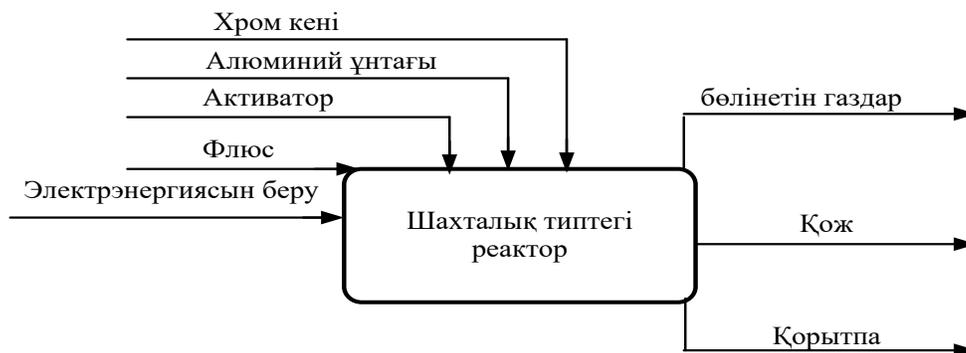
Симплекс (Simplex) процесі - төмен көміртекті феррохром (ТК ФХ) алу үшін жоғары көміртекті феррохром брикеттері балқытылып, вакуумды доғалы электр пешінде тотықсыздандырылады [13]. Дәстүрлі түрде бұл процесс Перрен және Дуплекс процесстеріне қарағанда электр энергиясын көп тұтынғандықтан тиімді емес деп есептеледі. Соңғы уақытта оның өнеркәсіптік қолданылуы жөнінде жаңа мәліметтер пайда болған жоқ.

Халафал (Halafal) әдісі - бір вакуумдық пеште хромит кені көміртекті тотықсыздандырғышпен әрекеттесіп, ТК ФХ алуға мүмкіндік береді [14, 15]. Пештің температурасы шамамен 1300 °С, ал қысым 0,0001-0,001 атм. деңгейінде болады. Технологиялық тұрғыдан әдіс тиімді, және электр энергиясын тұтыну Симплекс процесіне қарағанда төмен. Алайда, оның өнеркәсіптік масштабта қолданылғанын растайтын мәліметтер жоқ.

Вакуумдық пештерді қолданатын процестер (Симплекс және Халафал әдісі) зерттеуден алынып тасталды, себебі олардың өнеркәсіптік қолданылуы расталмаған. Технологиялық бағалау стандартты ТК ФХ өндірісіне бағытталып, қымбатқа түсетін төмен көміртекті ФХ өндіріс нұсқалары ескерілмеді.

Алюминий термиялық тотықсыздану процестері.

Кремнийдің орнына алюминий тотықсыздандырғыш ретінде қолданылады [16]. Процесте хром кені, ұнтақ алюминий, активатор (натрий нитраты) және ағындар алдын ала қыздырылған шахта типті реакторға жүктеледі. Қалпына келтіру реакциялары басталған соң, экзотермиялық энергия реакцияның жалғасуына қажетті жылуды қамтамасыз етеді. Бұл әдіс ультра төмен көміртекті қорытпаны (0,02%-дан аз) өндіруге мүмкіндік береді. Процестің схемасы 5-суретте көрсетілген.



Сурет 5 - Алюминий термиялық тотықсыздану процесі

Жақында Зимбабведе африкалық хром кенінде алюминотермиялық қалпына келтіру процесін қолданатын зауыт салынды. Салалық серіктестер бұл зауытты өте аз көміртекті феррохром өндіретін шағын кәсіпорын ретінде сипаттады. Алайда, мұндай зауыттар

алюминотермиялық қалпына келтіру кезінде бірнеше қиындықтарға тап болады:

- бір тонна хромитті қалпына келтіру үшін алюминийдің құны кремнийге қарағанда шамамен 40% жоғары;
- реакторлардың аздығы және олардың масштабталмауы қорытпаны қолмен іріктеуге байланысты, сондықтан өнімділікті арттыру үшін бірнеше пеш пен күрделі шығындар қажет;
- реакторларды пайдалану көп еңбек ресурсын талап етеді;
- қожды металға шығару кезінде ауытқулар болуы мүмкін;
- ұйымдастырылмаған шығарындылар зауыттың санитарлық-гигиеналық жағдайын нашарлатады.

Eissa және басқалардың мақаласында алюминотермиялық қалпына келтіру процесінің сипаттамасы берілген. Бұл мақалаға сәйкес хромның оңтайлы қалпына келуі 79%-ды құрайды, ал қождағы Cr_2O_3 мөлшері 13%-ға дейін жетуі мүмкін, бұл қож үйінділерінде Cr^{6+} хромының айтарлықтай болуына әкеледі.

Қорытынды

Әдеби шолу нәтижесінде төмен көміртекті феррохром өндірудің баламалы технологияларын қарастырып, оларға баға беру барысында қазіргі таңда салалық тұрғыда қолданылатын жалғыз тиімді нұсқалар Перрен процесі (дәстүрлі технология және оны жетілдірілген нұсқасы, онда қайта өңдеу үшін ковш орнына пеш қолданылады) және Дуплекс процесі екені анықталды. Екі процесс те бір сатылы процессіне қарағанда хромды жоғары деңгейде қалпына келтіруге мүмкіндік береді, бірақ Перрен процесі – алты валентті хром мөлшері минималды инертті шлак шығаруға мүмкіндік беретін жалғыз нұсқа. Сонымен қатар, Перрен және Дуплекс процестері өндірістік масштабта сенімділігі жоғары болып, қорытпаның сапасын тұрақты ұстайды. Дуплекс процесі кейбір жағдайларда Перрен процесіне қарағанда хромның қалпына келу көрсеткішін аздап төмендетсе де, оны қолдану қарапайым және өндірісте интеграциялауға ыңғайлы. Осылайша, қазіргі кезде салалық өндірісте төмен көміртекті феррохром алу үшін ең қолайлы және қауіпсіз шешім ретінде осы екі процесс саналады.

Әдебиеттер тізімі

1. Dworak S., Fellner J. Steel scrap generation in the EU-28 since 1946 – Sources and composition // Resources, Conservation and Recycling. – 2021. – Vol. 173.
2. Lee Y.E. Ferroalloys: Production and use in steel-making // Encyclopedia of Materials: Science and Technology. – Elsevier, 2001. – P. 3039–3044.
3. Holappa L. Basics of ferroalloys // Handbook of Ferroalloys. – Butterworth-Heinemann, 2013. – P. 9–28.
4. Erdem M., Altundoğan H.S., Turan M.D., Tümen F. Hexavalent chromium removal by ferrochromium slag // Journal of Hazardous Materials. – 2005. – Vol. 126, Issues 1–3. – P. 176–182.
5. Eric R.H. Production of Ferroalloys // Treatise on Process Metallurgy / ed. by S. Seetharaman, R. Guthrie, A. McLean, S. Seetharaman, H.Y. Sohn. – 2nd ed. – Elsevier, 2024. – P. 415–453.
6. Pujary A., Mohanty S., Rath T.P., Jena T., Pradhan N., Panda C. Physico-chemical and microstructure assessment of ferrochromium slag for its utilization consideration // Materials Today: Proceedings. – 2024.
7. Gencel O., Koksal F., Ozel C., Brostow W. Combined effects of fly ash and waste ferrochromium on properties of concrete // Construction and Building Materials. – 2012. – Vol. 29. – P. 633–640.
8. CN1143687A. One-step method for producing medium- and low-carbon ferrochromium
9. Güney H., Güner Ö., Boncuk F.F., Kan S., Benzeşik K., Yücel O. A decarbonization approach for FeCr production // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2023. – Vol. 9, № 1. – P. 216–229.
10. Östberg G. On the application of the Perrin process for ferro-alloy production // Scandinavian

Journal of Metallurgy. – 2003. – Vol. 32. – P. 157–170.

11. Bajželj A., Burja J. Thermodynamic guidelines for minimizing chromium losses in electric arc furnace steelmaking // *Metals*. – 2025. – Vol. 15, № 10. – Art. 1129.

12. Ghose S., Nanda J., Patel B.B. Duplex process for production of low carbon ferrochrome. – 1983.

13. Pickles C.A., Marzoughi O. Temperature and frequency dependencies of the permittivities of ferroalloys and reaction mixtures // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2023. – Vol. 126. – P. 181–191.

14. Pahlman J.C. Direct Method to Prepare Low Carbon Ferrochrome // *Physical Chemistry of Extraction Metallurgy: Proc. Conf., New York, USA, 24–28 Feb. 1985. – 1985.*

15. Khalafalla S.K. Direct Method to Prepare Low Carbon Ferrochrome // *Proceedings of the Conference on Physical Chemistry of Extraction Metallurgy. – Pennsylvania: Metallurgical Society of AIME, 1985. – P. 433.*

16. Moeller T., Bailar J.C., Kleinberg J., Guss C.O., Castellion M.E., Metz C. The Representative Metals // *Chemistry. – Academic Press, 1980. – P. 789–823.*

References

1. Dworak S., Fellner J. Steel scrap generation in the EU-28 since 1946 – Sources and composition // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2021. – Vol. 173.

2. Lee Y.E. Ferroalloys: Production and use in steel-making // *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. – Elsevier, 2001. – P. 3039–3044.

3. Holappa L. Basics of ferroalloys // *Handbook of Ferroalloys*. – Butterworth-Heinemann, 2013. – P. 9–28.

4. Erdem M., Altundoğan H.S., Turan M.D., Tümen F. Hexavalent chromium removal by ferrochromium slag // *Journal of Hazardous Materials*. – 2005. – Vol. 126, Issues 1–3. – P. 176–182.

5. Eric R.H. Production of Ferroalloys // *Treatise on Process Metallurgy / ed. by S. Seetharaman, R. Guthrie, A. McLean, S. Seetharaman, H.Y. Sohn. – 2nd ed. – Elsevier, 2024. – P. 415–453.*

6. Pujary A., Mohanty S., Rath T.P., Jena T., Pradhan N., Panda C. Physico-chemical and microstructure assessment of ferrochromium slag for its utilization consideration // *Materials Today: Proceedings*. – 2024.

7. Gencil O., Koksall F., Ozel C., Brostow W. Combined effects of fly ash and waste ferrochromium on properties of concrete // *Construction and Building Materials*. – 2012. – Vol. 29. – P. 633–640.

8. CN1143687A. One-step method for producing medium- and low-carbon ferrochromium

9. Güney H., Güner Ö., Boncuk F.F., Kan S., Benzeşik K., Yücel O. A decarbonization approach for FeCr production // *Journal of Sustainable Metallurgy*. – 2023. – Vol. 9, № 1. – P. 216–229.

10. Östberg G. On the application of the Perrin process for ferro-alloy production // *Scandinavian Journal of Metallurgy*. – 2003. – Vol. 32. – P. 157–170.

11. Bajželj A., Burja J. Thermodynamic guidelines for minimizing chromium losses in electric arc furnace steelmaking // *Metals*. – 2025. – Vol. 15, № 10. – Art. 1129.

12. Ghose S., Nanda J., Patel B.B. Duplex process for production of low carbon ferrochrome. – 1983.

13. Pickles C.A., Marzoughi O. Temperature and frequency dependencies of the permittivities of ferroalloys and reaction mixtures // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2023. – Vol. 126. – P. 181–191.

14. Pahlman J.C. Direct Method to Prepare Low Carbon Ferrochrome // *Physical Chemistry of Extraction Metallurgy: Proc. Conf., New York, USA, 24–28 Feb. 1985. – 1985.*

15. Khalafalla S.K. Direct Method to Prepare Low Carbon Ferrochrome // *Proceedings of the*

Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университетінің хабаршысы, №1 (83), наурыз 2026
Металлургиялық процестер мен технологиялар-Металлургические процессы и технологии-Metallurgical
processes and technologies
Conference on Physical Chemistry of Extraction Metallurgy. – Pennsylvania: Metallurgical Society of
AIME, 1985. – P. 433.

16. Moeller T., Bailar J.C., Kleinberg J., Guss C.O., Castellion M.E., Metz C. The Representative
Metals // Chemistry. – Academic Press, 1980. – P. 789–823.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОГО ФЕРРОХРОМА

ЖУМАГАЛИЕВ Е.У.* , **ШАБАНОВ Е.Ж.** , **РАХМЕТОВ Б.М.** , **ОРЫНБАЕВ Б.М.** 

*Жумагалиев Ерлан Уланович - Кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Актюбинский
региональный университет имени К.Жубанова, г. Ақтөбе, Қазақстан.

E-mail: yzhumagaliyev@zhubanov.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2227-0661>

Шабанов Ербол Жаксылықұлы - PhD, ассоциированный профессор, Актюбинский региональный университет
имени К.Жубанова, г. Ақтөбе, Қазақстан.

E-mail: yshabanov@zhubanov.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6902-1211>

Рахметов Бекжан Маратұлы - Магистрант, Актюбинский региональный университет имени К.Жубанова, г. Ақтөбе,
Қазақстан.

E-mail: jocular_91@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-4376-3152>

Орынбаев Бауыржан Мұнарбайұлы - Магистр, старший научный сотрудник, Актюбинский региональный
университет имени К.Жубанова, г. Ақтөбе, Қазақстан

E-mail: bauka929292@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7730-9060>.

Аннотация. Производство низкоуглеродистого и среднеуглеродистого феррохрома является стратегически
значимым направлением для металлургической отрасли, особенно в условиях ужесточения экологических
требований и роста спроса на качественные легирующие материалы. Производство низкоуглеродистого феррохрома
позволяет получать прочные и одновременно лёгкие сплавы, которые находят применение в автомобилестроении,
авиакосмической сфере и строительстве. Использование таких облегчённых материалов уменьшает расход энергии
при эксплуатации, особенно в транспорте и авиации. В настоящее время отечественное предприятие выпускает около
60 000 т/год продукции, однако сохраняется потенциал для увеличения мощности и совершенствования
технологических решений. Особую актуальность приобретает проблема образования шлака, содержащего
шестивалентный хром, который представляет экологический риск.

Настоящее исследование направлено на поиск оптимальной технологии для промышленного комплекса
будущего производства низкоуглеродистого феррохрома с увеличением объема выпуска. В работе рассматриваются
современные энергоэффективные и ресурсосберегающие методы выплавки, пути минимизации образования
шестивалентного хрома, а также технологии переработки и обезвреживания шлаков. Реализация предложенных
решений позволит повысить производительность, снизить экологическую нагрузку и обеспечить устойчивое
развитие предприятия.

Ключевые слова: ферросплавное производство, низкоуглеродистый феррохром, технологические схемы,
шлак, экологическая нагрузка.

TECHNOLOGICAL ASSESSMENT OF LOW-CARBON FERROCHROME PRODUCTION PROCESSES

ZHUMAGALIYEV YE.U.* , **SHABANOV YE.ZH.** , **RAKHMETOV B.M.** ,
ORYNBAYEV B.M. 

*Zhumagaliyev Yerlan Ulanovich - Candidate of technical sciences, associate professor, K. Zhubanov Aktobe regional
university, Aktobe, Kazakhstan.

E-mail: yzhumagaliyev@zhubanov.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2227-0661>

Shabanov Yerbol Zhaksylykuly - PhD, associate professor, K. Zhubanov Aktobe regional university, Aktobe, Kazakhstan.

E-mail: yshabanov@zhubanov.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6902-1211>

Rakhmetov Bekzhan Maratuly - Master student, K. Zhubanov Aktobe regional university, Aktobe, Kazakhstan.

E-mail: jocular_91@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-4376-3152>

Orynbayev Bauyrzhan Munarbaiuly - Master, senior researcher, K. Zhubanov Aktobe regional university, Aktobe, Kazakhstan.

E-mail: bauka929292@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7730-9060>

Abstract. The production of low-carbon and medium-carbon ferrochrome is a strategically significant area for the metallurgical industry, particularly in the context of increasingly stringent environmental regulations and growing demand for high-quality alloying materials. The production of low-carbon ferrochrome allows for the production of strong yet lightweight alloys used in the automotive, aerospace, and construction industries. The use of such lightweight materials reduces energy consumption during operation, particularly in transportation and aviation. Currently, the domestic enterprise produces approximately 60,000 tons of products per year; however, there remains substantial potential for increasing capacity and improving technological solutions. Of particular relevance is the issue of slag formation containing hexavalent chromium, which poses a serious environmental risk.

This study aims to identify the optimal technology for the industrial complex of a future low-carbon ferrochrome production facility with expanded output capacity. The paper examines modern energy-efficient and resource-saving smelting methods, approaches to minimizing the formation of hexavalent chromium, as well as technologies for slag processing and detoxification. The implementation of the proposed solutions will enhance productivity, reduce environmental impact, and ensure the sustainable development of the enterprise.

Key words: ferroalloy production, low-carbon ferrochrome, technology-intensive process schemes, slag, environmental impact.