

Код МРНТИ 53.01.91

А.А. Абілберікова¹, *Е.У. Жумағалиев², Б.Т. Уахитова², Е.Ж. Шабанов²
¹Қарағанды индустриялық университеті (Теміртау қ., Қазақстан),
²ZHUBANOV UNIVERSITY (Ақтөбе қ., Қазақстан)

ФЕРРОХРОМ ҚОЖДАРЫН ҚАЙТА ӨНДЕУ: ДӘСТҮРЛІ ТЕХНОЛОГИЯЛАР ЖӘНЕ ЖАҢА БАҒЫТТАР

Аннотация. Мақалада феррохром қождарын қайта өңдеудің дәстүрлі және заманауи технологияларына жүйелі талдау жасалған. Оларға пирометаллургиялық, гидрометаллургиялық, физика-механикалық әдістер, сондай-ақ плазмалық қайта өңдеу, биошаймалау, нанобелсендіру және тұрақты ток пештерін қолдану сияқты инновациялық тәсілдер жатады. Хромның шығымын арттыру, экологиялық жүктемені азайту және қождарды қайталама айналымға енгізу маңыздылығы атап өтілген. Негізгі параметрлер: Cr шығымы, температура, энергия сыйымдылығы және енгізу сатысы бойынша салыстырмалы бағалау жүргізілген. Ақтөбе феррокорытпа зауытында сәтті өнеркәсіптік іске асыру мысалы келтірілген. Нәтижелер ресурсты үнемдейтін және экологиялық тұрғыдан қауіпсіз шешімдерді енгізу қажеттілігін көрсетеді, бұл циркулярлық экономикаға көшу шеңберінде өзекті болып отыр.

Түйінді сөздер: феррохром қождары, қайта өңдеу әдістері, дәстүрлі тәсілдер, инновациялық әдістер, технологияларды салыстырмалы талдау, өнеркәсіптік кейс.

Ferrochrome slag processing: traditional technologies and new directions

Abstract. The article presents a systematic analysis of traditional and modern technologies for processing ferrochrome slags, including pyrometallurgical, hydrometallurgical, and physico-mechanical methods, as well as innovative approaches such as plasma processing, bioleaching, nanoactivation, and the use of DC furnaces. Emphasis is placed on improving chromium recovery, reducing environmental impact, and reintegrating slags into the secondary cycle. A comparative evaluation is provided based on key parameters: Cr recovery, temperature, energy consumption, and implementation stage. An example of successful industrial implementation at the Aktobe Ferroalloy Plant is given. The results highlight the necessity of adopting resource-efficient and environmentally safe solutions in the context of transitioning to a circular economy.

Key words: ferrochrome slags, processing methods, traditional methods, innovative methods, comparative technology analysis, industrial case.

Переработка шлаков феррохрома: традиционные технологии и новые направления

Аннотация. В статье представлен системный анализ традиционных и современных технологий переработки феррохромовых шлаков, включая пирометаллургические, гидрометаллургические, физико-механические методы, а также инновационные подходы, такие как плазменная переработка, биовыщелачивание, наноактивация и использование DC-печей. Подчеркивается важность повышения извлечения хрома, снижения экологической нагрузки и включения шлаков во вторичный оборот. Проведена сравнительная оценка по основным параметрам: извлечение Cr , температура, энергоёмкость и стадия внедрения. Приведен пример успешной промышленной реализации на Актюбинском заводе ферросплавов. Результаты подчеркивают необходимость внедрения ресурсосберегающих и экологически безопасных решений в рамках перехода к циркулярной экономике.

Ключевые слова: феррохромовые шлаки, методы переработки, традиционные методы, инновационные методы, сравнительный анализ технологий, индустриальный кейс.

Кіріспе

Феррохром – тот баспайтын және легіріленген болаттар өндірісінде стратегиялық маңызы бар қорытпа сәналады және оның өндірісі феррохром қождары түрінде айтарлықтай көлемде қатты өндірістік қалдықтардың түзілуімен қатар жүреді [1, 2]. Жоғарыкөміртекті феррохромды балқыту үдерісінде қож бен металлдың массалық арақатынасы 1:1-ге дейін жетеді, бұл ретте қож құрамында 4–20% Cr_2O_3 , сондай-ақ айтарлықтай мөлшерде FeO , SiO_2 , Al_2O_3 және басқа да компоненттер қалады [3, 4]. Қождардан бөлек, Cr_2O_3 концентрациясы 40%-ға дейін жететін шанды қалдықтар да көп көлемде түзіледі, бұл қоршаған ортаға техногендік жүктемені арттырады.

Бұл қалдықтар экологиялық тұрғыдан қауіпті ғана емес, сонымен қатар әлеуетті құнды техногендік шикізат болып табылады. Алайда оларды қайта өңдеудің тиімді әрі әмбебап технологияларының болмауы салдарынан миллиондаған тонна қалдықтар үйінділерде жиналып, металл шығындарына және феррокорытпа зауыттары орналасқан аймақтардағы экологиялық жағдайдың нашарлауына әкеледі.

Соңғы жылдары зерттеушілер мен өнеркәсіптік кәсіпорындардың назары жаңа технологиялық шешімдерді: классикалық пирометаллургиялық және гидрометаллургиялық үдерістерден бастап плазмалық қайта өңдеу, тұрақты ток пештерін (DC-пештер) қолдану, биошаймалау және нанобелсендіру сияқты инновациялық тәсілдерге дейін әзірлеуге бағытталуда [4–7].

Феррохром қождарын кәдеге жаратуға арналған ресурсты үнемдейтін, экологиялық тұрғыдан қауіпсіз және

экономикалық жағынан тиімді әдістерді әзірлеу мен енгізудің өзектілігі тек хром шығындарын азайту қажеттілігімен ғана емес, сонымен қатар айналмалы экономиканың қағидаттарына көшу қажеттілігімен де негізделеді [8]. Бұл қолданыстағы өндірістер жағдайында технологиялардың тиімділігі, тұрақтылығы және ауқымын кеңейту мүмкіндігін ескере отырып, жүйелі тәсілді талап етеді.

Мақалада феррохром қождарын қайта өңдеудің дәстүрлі және қазіргі заманғы технологиялық бағыттарына шолу жасалып, түрлі әдістердің тиімділігіне салыстырмалы талдау, сондай-ақ олардың өнеркәсіптік жетілу деңгейі, экологиялық қауіпсіздігі және экономикалық тиімділігі бойынша бағалау ұсынылады.

1. Феррохром қождарының құрамы мен физика-химиялық қасиеттері. Феррохром қождары – хромды тотықтардан тотықсыздандыру үдерісі кезінде доғалы және рудатермиялық пештерде түзілетін күрделі көпкомпонентті жүйелер. Негізгі компоненттерге Cr_2O_3 , FeO , SiO_2 , CaO , MgO , Al_2O_3 , сондай-ақ хромшпинельдер мен хромферриттер фазалары жатады. Сұйық қождардағы Cr_2O_3 концентрациясы 4–5%-ға дейін, ал шанды қалдықтарда 20–43%-ға дейін жетуі мүмкін [3, 4].

Феррохром қождарының физика-химиялық қасиеттері оларды қайта өңдеу әдістерін таңдауда шешуші рөл атқарады. Қождарға жоғары балку температурасы (1450–1650 °C) тән, бұл құрамында MgO , Cr_2O_3 және Al_2O_3 болуына байланысты [3]. Шамамен 1500 °C температурада қождардың тұтқырлығы негізділік пен тотығу дәрежесіне қарай 0,5–2,5 Па·с болады, ал тұтқырлықтың жоғары болуы металлдарды алу тиімділігін төмендетеді [4].

Қождардың орташа тығыздығы – 2,8–3,5 г/см³, бұл гравитациялық сепарация әдістерін тиімді қолдануға мүмкіндік береді [3]. Құрамында SiO_2 көп көбік түзуші қождардың жылу өткізгіштігі төмен (0,5–1,0 Вт/м·К), бұл пеш ішіндегі жылу алмасуды нашарлатады.

Сонымен қатар, қождардың құрамында феррохромның ұсақ дисперсті қосындылары мен бейметалл фазалар бар, олар температуралық және химиялық градиенттер әсерінен салқындау кезінде өздігінен ұсақталуға бейім, бұл металлдарды алуы жеңілдетеді.

Сонымен, феррохром қождары – тек қауіпті техногендік қалдықтар ғана емес, сонымен қатар олардың физика-химиялық қасиеттерін ескере отырып дұрыс өндеу әдісі таңдалған жағдайда, хром, темір және басқа да элементтердің құнды көзі болып табылады.

2. Қайта өңдеудің дәстүрлі әдістері

2.1. *Физика-механикалық әдістер.* Физика-механикалық қайта өндеу ұсақтау (70 мм және ұсақ), классификация, магниттік және гравитациялық сепарация, флотация кезеңдерін қамтиды. Магниттік сепарация төмен және ортакөміртекті феррохром қождарының салқындау кезіндегі өздігінен ұсақталуға бейімділігі арқасында металлды тиімді бөліп алуға мүмкіндік береді [3]. Алдын ала ұсақтау мен магниттік сепарация арқылы, әсіресе ауа классификациясы немесе гравитациялық байыту қолданыласа металл қосындыларындағы хромның 50–60%-ын алуға болады [3, 5]. Алайда, бұл әдіс хромшпинельдер құрамындағы Cr_2O_3 сияқты химиялық тұрақты қосылыстар үшін тиімді емес және толық алу үшін пиро- немесе гидрометаллургиялық әдістер қажет [4]. 1-кестеде әдістің артықшылықтары мен кемшіліктері келтірілген [3, 4, 6].

2.1. *Пирометаллургиялық қайта өндеу.* Феррохром қождарының қайта өңделуінде ең кең таралған әдіс – электрдоғалық, индукциялық және тұрақты ток пештерінде хром мен темірді тотықсыздандыру. Тотықсыздандырғыш ретінде құрамында көміртегі пен кремний бар реагенттер қолданылады. 2-кестеде пирометаллургиялық әдістің артықшылықтары мен кемшіліктері келтірілген [3, 4].

Сондай-ақ, плазмалық газ жағу немесе индукциялық қыздыру мен көміртекті тотықсыздандыруды біріктіретін гибриді технологиялар белсенді зерттелуде. Бұл әдістер тұрақтырақ жылулық режимді қамтамасыз етеді, өндеу уақытын қысқартады [5].

2.3. *Гидрометаллургиялық үдерістер.* Феррохром қождарының гидрометаллургиялық қайта өңделуі алдын ала күйдірілген немесе механикалық белсендірілген материалдардан Cr -ді сілтілік ($NaOH$, Na_2CO_3) немесе қышқылдық (H_2SO_4 , HCl , HNO_3) ерітінділермен шаймалауға негізделген. Негізгі мақсат – хромшпинельдер мен силикаттар құрамындағы Cr (III)-ті ерігіш Cr (VI) түріне көшіру, ол үшін 800–1000 °С температурада тотықтыра күйдіру қажет [5]. Әдістің артықшылықтары мен кемшіліктері 3-кестеде көрсетілген [6].

Шаймалау үдерісі әдетте 60–90 °С температурада және рН 1,5–3,0 (қышқылды ортада) немесе рН > 10 (сілтілі ортада) жүргізіледі. Бірсатылы, тұндырумен қатар жүретін сілтілік және біріктірілген әдістер қолданылады. Ең тиімдісі – термобелсендіру мен қышқылдық шаймалауды біріктіретін екісатылы үдеріс. Қож құрамына, ұнтақтығы-

на, реагенттер концентрациясы мен шаймалау уақытына байланысты Cr алу шығымы 60–85% құрайды. Параметрлерді оңтайландырып, H_2SO_4 -ті H_2O_2 немесе $NaClO_3$ секілді тотықтырғыштармен бірге қолданғанда Cr -ді 80–85% дейін алуға болады [5, 6].

3. Заманауи және перспективті технологиялар

3.1. *Плазмалық қайта өңдеу.* Плазмалық қайта өндеу – бұл қождарды балқыту және металлдарды тотықсыздандыру үшін жоғары температуралы плазманы (3000 °С-қа дейін) пайдалануға негізделген инновациялық әдіс. Бұл әдіс отқа төзімділігі жоғары және қиын ыдырайтын қождарды, соның ішінде Cr_2O_3 пен MgO мөлшері көп құрамдарды өндеуде ерекше тиімді. Бұл мақсатта материалға тұрақты жылулық әсер етуге мүмкіндік беретін графитті немесе суытқышпен салқындатылатын электродтары бар плазмалық доғалы қондырғылар қолданылады. 4-кестеде осы әдістің артықшылықтары мен кемшіліктері [4, 5] деректеріне сүйене отырып келтірілген.

Плазманы қолдану кезінде тотықсыздандырғыш газдарды (мысалы, H_2 немесе CO) қосуға болады, бұл ортадағы тотығу деңгейін төмендетіп, хромды тотықсыздандыру тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді [8].

3.2. *Биотехнологиялар.* Биошаймалау (биоличинг) – бұл металлдарды қатты материалдардан микроорганизмдер көмегімен шығару процесі. Негізінен *Acidithiobacillus ferrooxidans* және *Leptospirillum ferrooxidans* тектес тотығушы бактериялар қолданылады, олар Cr , Fe , Mn және басқа элементтерді еріткіш формаға ауыстыру қабілетіне ие. Бұл микроорганизмдер қышқыл ортада (рН шамамен 2–3) және 25–35 °С температурада тотығу және металлдардың ерігіш түрлерінің түзілуін белсендіреді.

Биошаймалау кезінде хромды алу тиімділігі оның қождағы химиялық түріне байланысты: хромшпинель ($MgCr_2O_4$) құрамындағы Cr нашар ериді, ал аморфты тотықтар мен ұсақ қосындылар түріндегі Cr оңайырақ алынады. [5, 6] деректеріне сәйкес, биошаймалау арқылы Cr -ді алу дәрежесі 30–60% құрайды, ал алдын ала механика-химиялық белсендіру немесе термиялық өндеу бұл көрсеткішті зертханалық жағдайда 70%-ға дейін арттыруы мүмкін. Биошаймалау ұсақталған және белсендірілген қождарға ең тиімді, 25–35 °С температурада және рН ~2–3 жағдайында бірнеше күннен бірнеше аптаға дейін созылады, көбіне бағаналы немесе үйінді қондырғыларда, негізінен зертханалық ауқымда жүргізіледі. 5-кестеде [5] деректеріне негізделген әдістің артықшылықтары және [7, 9] деректеріне сәйкес кемшіліктері көрсетілген.

Биошаймалау саласындағы зерттеулер жалғасуда, әсіресе ауыр металлдарға және экстремалды орта жағдайларына төзімдірек генетикалық түрлендірілген штаммдарға бағытталған.

3.3. *Нанобелсендіру.* Феррохром қождарын қайта өндеуде нанобелсендіру, әсіресе байытуға қиын немесе химиялық бейтарап қождарда Cr бар фазалардың реакциялық қабілетін арттырудың болашағы зор әдісі ретінде қарастырылады. Бұл әдістер хромды кешенді силикатты және хромшпинель қосылыстарынан тиімді алу шарттарын жақсартуға бағытталған.

Нанобелсендіру феррохром қожына нанокұрылымды қоспалар (мысалы, нано- SiO_2 , графен тәрізді құрылымдар,

Физика-механикалық қайта өңдеудің артықшылықтары мен кемшіліктері

Кесме 1

Advantages and disadvantages of physical-mechanical processing

Table 1

Преимущества и недостатки физико-механической переработки

Таблица 1

Артықшылықтары	Кемшіліктері
<ul style="list-style-type: none"> ✓ химиялық реагенттер қолданылмайды, экологиялық таза үдеріс; ✓ металл қосындыларын жылулық өңдеусіз механикалық жолмен бөліп алу; ✓ жоғары өнімділік және желіні ұйымдастырудың қарапайымдылығы; ✓ қождың алдын ала өздігінен ұсақталуы жағдайында тиімділік жоғары. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ химиялық байланысқан Cr-ді толық ала алмау; ✓ магниттелмейтін фазаларда тиімділіктің төмендігі; ✓ жарамсыз фракцияларды кейінгі кәдеге жарату қажеттілігі; ✓ ұсақ дисперсті қосындыларға селективтіліктің төмендігі.

Кесме 2

Пирометаллургиялық қайта өңдеудің артықшылықтары мен кемшіліктері

Table 2

Advantages and disadvantages of pyrometallurgical processing

Таблица 2

Преимущества и недостатки пирометаллургической переработки

Артықшылықтары	Кемшіліктері
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Cr және Fe-дің шығымы 90-95%; ✓ берілген химиялық құрамдағы феррокорытпа алу; ✓ қождар мен шанды қайта өңдеу мүмкіндігі – үдерістің әмбебаптығы. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ жоғары температура (1700 °C дейін); ✓ жоғары энергия шығыны (әсіресе дәстүрлі пештерде); ✓ ашық доғалы агрегаттарда зиянды шығарындылардың пайда болуы.

Кесме 3

Гидрометаллургиялық қайта өңдеудің артықшылықтары мен кемшіліктері

Table 3

Advantages and disadvantages of hydrometallurgical processing

Таблица 3

Преимущества и недостатки гидрометаллургической переработки

Артықшылықтары	Кемшіліктері
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Cr-ді жоғары селективтілікпен алу; ✓ қождар мен шанды кешенді өңдеу; ✓ қолжетімді жабдықтар мен реагенттер; ✓ Фильтраттарды қалпына келтіру мүмкіндігі. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ бейтараптандыруды қажет ететін ұйтты сұйық қалдықтар; ✓ жоғары температурада күйдіру қажеттілігі; ✓ Cr (VI) тәрізді қауіпті қосылыстардың түзілу қаупі; ✓ үдерістің ұзақтығы және көпсатылығы.

Кесме 4

Плазмалық әдіспен қайта өңдеудің артықшылықтары мен кемшіліктері

Table 4

Advantages and disadvantages of plasma processing

Таблица 4

Преимущества и недостатки плазменной переработки

Артықшылықтары	Кемшіліктері
<ul style="list-style-type: none"> ✓ қиын балқытын қождарды флюссыз балқыту; ✓ Cr мен басқа металлдар шығымы 95%; ✓ қатты қалдықтардың аз мөлшері; ✓ үдерісті тез баптау және басқару; ✓ жергілікті және шағын қондырғыларға бейімделгіш. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ жабдық пен электр энергиясының жоғары құны; ✓ қаптамалау үшін арнайы отқа төзімді материалдардың қажеттілігі; ✓ тәжірибелік деңгейде ғана қолданылуы; ✓ үздіксіз өндірісте масштабтау және пайдаланудағы қиындықтар.

Кесме 5

Биошаймалау әдісімен қайта өңдеудің артықшылықтары мен кемшіліктері

Table 5

Advantages and disadvantages of bioleaching processing

Таблица 5

Преимущества и недостатки переработки методом биовыщелачивания

<i>Артықшылықтары</i>	<i>Кемшіліктері</i>
<ul style="list-style-type: none"> ✓ экологиялық тазалығы: уытты реагенттер қолданылмайды; ✓ жылулық әдістермен салыстырғанда энергия шығыны төмен; ✓ күрделі көп компонентті қалдықтарды қайта өңдеу мүмкіндігі. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ реакцияның баяу жүруі (бірнеше аптаға дейін); ✓ микробтық ортаны сақтау, рН, температура мен аэрацияны бақылау қажеттілігі ✓ Cr(III) концентрациясы жоғары жағдайда тиімділіктің төмендігі – алдын ала белсендіру қажет.

Fe_3O_4 және көміртекті нанотүтікшелер) енгізуді көздейді. Бұл жалпы реакциялық бетті ұлғайтуға, қож құрылымын түрлендіруге, сондай-ақ Cr_2O_3 тотықсыздандыру кезінде жылу беру мен каталикалық әсерлерді жақсартуға ықпал етеді.

Лазерлік белсендіру хромшпинельдердің кристалдық торын жергілікті қыздыру және бұзу әдісі ретінде зерттелуде, бұл хромды кейінгі селективті тотықсыздандыруды жеңілдетеді.

[5, 6] деректеріне сәйкес, нанокұрылымды активаторларды қолдану хромды алуды дәстүрлі әдістермен салыстырғанда 15–20%-ға арттыруы мүмкін, ал термиялық немесе механика-химиялық белсендірумен үйлестірілгенде бұл көрсеткіш 70–80%-ға дейін жетеді. Бұл технологиялар зертханалық зерттеу кезеңінде болғанымен, байытуға қиын феррохром қождарын кәдеге жаратуда жоғары әлеует көрсетіп отыр. 6-кестеде [5, 6] деректеріне негізделген әдістің артықшылықтары және [6, 7] бойынша кемшіліктері келтірілген.

3.4. *Феррохром қождарын қайта өңдеуге арналған тұрақты ток пештері (DC-пештер)*. Тұрақты ток электр пештері (DC furnaces) феррохром өндірісінің ұсақ дисперсті техногендік қалдықтарын – шаң, ұсақталған қож және флотациялық концентраттарды қайта өңдеуде барған сайын танымал болуда. Дәстүрлі айнымалы ток доғалы пештерінен айырмашылығы, DC-пештер алдын ала агломерациясыз материалды өңдеуге мүмкіндік береді, бұл технологиялық үдерісті едәуір жеңілдетіп, арзандатады [3, 4].

Бұл технологияда ток жоғарғы жағынан графит электрод арқылы беріліп, түбіндегі футеровка арқылы қайтарылатын ток жүйесі қолданылады. Бұл ваннаның тұрақты формасын қамтамасыз етіп, Cr_2O_3 -ті терең тотықсыздандыруға мүмкіндік береді. Сондай-ақ, жылу режимін шикізат түріне – қож, шаң немесе концентрат – қарай икемді түрде реттеуге болады. 7-кестеде әдістің [3, 7] деректеріне негізделген артықшылықтары және [7] бойынша кемшіліктері келтірілген.

4. *Технологияларды салыстырмалы бағалау: хромды алу басымдығы – тиімділіктің негізгі критерийі*. Феррохром қождарын қайта өңдеудің барлық қарастырылған технологияларында өз артықшылықтары мен елеулі шектеулері бар. Бұл әдістер энергия шығыны, экологиялық қауіпсіздік, технологиялық күрделілік және енгізу

құны бойынша ерекшеленеді. Осы технологиялардың негізгі сипаттамаларын көрнекі түрде салыстыру 8-кестеде берілген, онда олардың артықшылықтары, кемшіліктері және хромды алу деңгейі жинақталған.

5. *Индустриялық кейс: феррохром қождарын кешенді қайта өңдеу – Ақтөбе ферроқорытпа зауыты (ERG Recycling)*. ERG Recycling негізінде Ақтөбе ферроқорытпа зауытында жүзеге асырылған жоба феррохром қождарын кешенді өңдеудің тиімді үлгісін көрсетеді. Бұл тәжірибе механика-физикалық өңдеу, брикеттеу және концентраттарды қайта балқыту арқылы қалдықтарды азайтып, хром концентраттары мен құрылыс материалдарын алуға мүмкіндік берді.

1) *Қож үйінділерін қайта өңдеу* – жылына 50 мың тоннадан басталып, 500 мың тоннаға дейін ұлғайту жоспарланған. Нәтижесінде хром концентраты мен инертті құрылыс материалдары (қиыршық тас, құм) алынады.

2) *Шаң мен қалдықтарды брикеттеу* – газтазалау шаңы мен ұсақ дисперсті қождар негізінде хром брикеттерін өндірудің бірегей технологиясы енгізілді. Бұл брикеттер қайта балқыту үдерісіне қайтарылады.

3) *Қожды пневмосепарациялау (0–5 мм фракция)* – құрғақ байыту технологиясы бірнеше өнім береді: хром концентраты (қайта балқытуға), минералдық ұнтақ және құрылыс материалдары.

4) *Бетон өндірісі* – қождар бетон мен темірбетон бұйымдарына сертификатталған толтырғыш ретінде қолданылады. Комплекс сағатына 30 м³-ке дейін жоғары маркалы бетон өндіреді.

5) *«Қиыршық тас» жобасы* – жыл сайын жол және азаматтық құрылыста қолданылатын 1 млн тоннаға дейін инертті қож сатылады. Өнім сертификатталған және тұрақты зертханалық бақылаудан өтеді [10].

Экономикалық және экологиялық нәтижелер – қож үйінділерінің көлемін айтарлықтай қысқарту, концентраттарды қайта пайдалану арқылы хромды алудың артуы, қалдықтардан сұранысқа ие өнімдер (тауарлық бетон, құрылыс блоктары, минералды ұнтақ) шығару, сондай-ақ табиғи инертті материалдарға тәуелділікті азайту. ERG Recycling жобасы – феррохром қалдықтарын жоғары тиімділікпен және кең өнім ассортиментімен қайта өңдеудің өнеркәсіптік тұрғыда жүзеге асырылатын тұйық

Нанобелсендіру әдісімен қайта өңдеудің артықшылықтары мен кемшіліктері

Кесте 6

Advantages and disadvantages of nanoactivation processing

Table 6

Преимущества и недостатки переработки феррохромовых шлаков

Таблица 6

Артықшылықтары	Кемшіліктері
<ul style="list-style-type: none"> ✓ пассивті <i>Cr</i>-фазаларды белсендіру; ✓ тотықсыздандыру температурасын төмендету; ✓ кождарды өндірістік циклге тиімдірек интеграциялау. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ наноматериалдардың жоғары құны; ✓ дозалар мен режимдерді дәл таңдау қажеттілігі; ✓ өнеркәсіптік сынақтардың болмауы; ✓ масштабтаудағы қиындықтар.

Кесте 7

Плазмалық әдіспен қайта өңдеудің артықшылықтары мен кемшіліктері

Advantages and disadvantages of plasma processing

Table 7

Преимущества и недостатки плазменной переработки

Таблица 7

Артықшылықтары	Кемшіліктері
<ul style="list-style-type: none"> ✓ <i>Cr</i> және <i>Fe</i>-ні 90–95% дейін тиімді алу; ✓ ұсақ фракцияларды алдын ала дайындықсыз қайта өңдеу; ✓ дәстүрлі пештермен салыстырғанда энергия шығыны төмен; ✓ шығарындылардың азаюы, жылуды рекуперациялау; ✓ жаңартылатын энергия көздерінен (мысалы, күн электр станциялары) жұмыс істеу мүмкіндігі; ✓ қайталама кождарды құрылысқа немесе қайта балқытуға пайдалану. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ қондырғы мен инфрақұрылымның жоғары құны; ✓ қолданыстағы өндіріс жүйесіне интеграциялау күрделі; ✓ футеровканың тозуы және оны тұрақты ауыстыру қажеттілігі; ✓ ірі өндірістік орталықтардан тыс шектеулі қолдану.

Кесте 8

Феррохром кождарын қайта өңдеу технологияларының негізгі параметрлері бойынша салыстырмалы сипаттамасы

сипаттамасы

Table 8

Comparative characteristics of ferrochrome slag processing technologies based on key parameters

Таблица 8

Сравнительная характеристика технологий переработки феррохромовых шлаков по основным параметрам

Технологиялар	Хромның шығымы, %	Температура, °C	Энергия сыйымдылығы	Енгізу сатысы
Пирометаллургия	90–95	1300–1700	Высокая	Өнеркәсіптік
Гидрометаллургия	60–85	300–1000	Средняя	Пилоттық
Физика-механикалық әдістер	50–60	RT	Низкая	Өнеркәсіптік
Плазмалық қайта өңдеу	95	2000–3000	Очень высокая	Эксперименттік
Биошаймалау	30–60	25–35	Низкая	Зертханалық
Нанобелсендіру	70–80	до 1000	Средняя	Зертханалық
DC-пештер	90–95	>1600	Средняя	Өнеркәсіптік

циклді моделін көрсетеді. Бұл модель металлургия мен құрылыс саласын қатар қамтиды.

Қорытынды

Феррохром кождарын қайта өңдеудің заманауи және дәстүрлі әдістерін талдау әр технологияның техникалық, экономикалық және экологиялық факторларға байланысты артықшылықтары мен шектеулері бар екенін көрсетті.

Тиімділіктің негізгі критерийі – хромды алу дәрежесі, себебі дәл осы көрсеткіш кожды қайталама шикізат ретінде бағалауға мүмкіндік береді. Салыстыру нәтижесі бойынша ең жоғары тиімділік пирометаллургиялық әдістер мен DC-пештерді қолданатын технологияларға тиесілі, олар *Cr*-ді 95%-ға дейін алуға мүмкіндік береді.

Ақтөбе феррокорытпа зауытының (ERG Recycling) тәжірибесі механикалық және физикалық қайта өңдеуді,

брикеттеуді және концентраттарды қайта балқытуға қайтаруды біріктіретін тәсілдің тиімділігін дәлелдеді. Бұл әдіс қалдық көлемін азайтып қана қоймай, сонымен қатар тауарлық өнім – хром концентраттары, құрылыс материалдары және бетон бұйымдарын алуға мүмкіндік берді.

Зерттеулердің перспективаларына біріктірілген сұлбаларды (механикалық белсендіру + гидрометаллургия) дамыту, жаңа технологияларды (плазмалық қайта өңдеу, биошаймалау) ірі ауқымда енгізу, энергия тиімділігін арт-

тыру және автоматтандыру жатады. Циркулярлы экономика жағдайында мұндай шешімдер тұрақты металлургия үшін маңызды.

АЛҒЫС

Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің қаржылық қолдауымен жүзеге асырылды (грант №BR24992882).

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Ахметова С.А., Уразов К.Ш., Муртазина Г.Н. Ферроқорытпа өндірісінің қалдықтарын кәдеге жарату // «Ғылым мен білімнің заманауи мәселелері» атты халықаралық ғылыми-практикалық конференция материалдары, Алматы: ҚазҰТЗУ, 2017. Б. 45–51 (орыс тілінде)
2. Валуев Д.В., Гизатуллин Р.А. Металлургиялық қалдықтарды өңдеу технологиялары: оқу құралы / Д.В. Валуев; Юрга технологиялық институты. Томск: Томск политехникалық университетінің баспасы, 2012. 196 б. (орыс тілінде)
3. Жучков В.И., Садыков Т.О., Кайбышев Р.О. Ферроқорытпа өндірісінің қождары мен шаңдары // Ресей металлургиясы (Металдар). 2020. № 5. Б. 447–453 (ағылшын тілінде)
4. Жіңішке фракциялы феррохром шикізатын тұрақты ток пештерінде балқыту / Отердум Х. [және т.б.] // Металлургиялық және материалтану бойынша зерттеулер В. 2024. Т. 55. Б. 218–231 (ағылшын тілінде)
5. Хром құрамды шлактарды тиімді қайта өңдеу / Чжао Б. [және т.б.] // Metals. 2024. Т. 14. № 2. Б. 246 (ағылшын тілінде)
6. Экструзияның феррохром қождарынан хромның ерігіштігіне әсері / Дас С. [және т.б.] // Тұрақты металлургия журналы. 2022. Т. 8. Б. 1457–1469 (ағылшын тілінде)
7. Хабаши Ф. Экстрактивті металлургиядағы соңғы тенденциялар: Квебек: Квебектің металдарды алу металлургиясы, 2007. 360 б. (ағылшын тілінде)
8. Тот баспайтын болат өндірісінің қождары үшін циркулярлы экономиканың мүмкіндіктеріне шолу / Холалпа Л. [және т.б.] // Тұрақты металлургия журналы. 2021. Т. 7. Б. 1–18 (ағылшын тілінде)
9. Ролингс Д.Е. Металды биологиялық қалпына келтіру және бактериялардың рөлі // Биотехнологиядағы қазіргі пікірлер. 2002. Т. 13. № 3. Б. 255– (ағылшын тілінде)
10. «Ферроқорытпалар өндірісі» ең үздік қолжетімді техникалар жөніндегі анықтамалық» Қазақстан Республикасы Үкіметінің қаулысы, Астана қ., 27.12.2023. (орыс тілінде)

REFERENCES

1. Akhmetova S.A., Urazov K.Sh., Murtazina G.N. Utilizatsiya otkhodov ferrosplavnogo proizvodstva [Utilization of Ferroalloy Production Waste], Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya» [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Modern Problems of Science and Education»], Almaty: KazNITU, 2017. 45–51 pp. (in Russian)
2. Valuev D.V., Gizatullin R.A. Tekhnologii pererabotki metallurgicheskikh otkhodov: uch. posobie [Technologies for the Processing of Metallurgical Waste: A Textbook], D.V. Valuev; Yurginskii tekhnologicheskii institut [Yurga Technological Institute]. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2012. 196 p. (in Russian)
3. Zhuchkov V.I., Sadykov T.O., Kaibyshev R.O. Slags and Dusts of Ferroalloy Production // Russian Metallurgy (Metally). 2020. No. 5. 447–453 pp. (in English)
4. DC Furnace Smelting of Fine Ferrochrome Raw Materials / Oterdoom H. [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions B. 2024. V. 55. 218–231 pp. (in English)
5. Valuable Recovery of Chromium-Containing Slags / Zhao B. [et al.] // Metals. 2024. V. 14. No. 2. 246 p. (in English)
6. Effect of Extrusion on the Physical Properties and Leachability of Chromium from Ferrochrome Slag / Das S. [et al.] // Journal of Sustainable Metallurgy. 2022. V. 8. 1457–1469 pp. (in English)
7. Habashi F. Recent Trends in Extractive Metallurgy: Quebec: Metallurgie Extractive Quebec, 2007. 360 p. (in English)
8. A Review of Circular Economy Prospects for Stainless Steelmaking Slags / Holappa L. [et al.] // Journal of Sustainable Metallurgy. 2021. – V. 7. 1–18 pp. (in English)
9. Rawlings D.E. Microbial Mineral Recovery and the Role of Bacteria in Metal Extraction // Current Opinion in Biotechnology. 2002. V. 13. No. 3. 255–261 pp. (in English)

10. *Postanovlenie pravitel'stva Respubliki Kazakhstan «Spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnikam «Proizvodstvo ferrosplavov» [Resolution of the Government of the Republic of Kazakhstan «Handbook of the best available techniques for the production of ferroalloys»], Astana, 12/27/2023. (In Russian)*

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Ахметова С.А., Уразов К.Ш., Муртазина Г.Н. Утилизация отходов ферросплавного производства // Материалы Международной научно-практической конференции «Современные проблемы науки и образования», Алматы: КазННТУ, 2017. С. 45–51 (на русском языке)*
2. *Валуев Д.В., Гизатуллин Р.А. Технологии переработки металлургических отходов: уч. пособие / Д.В. Валуев; Юргинский технологический институт. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 196 с. (на русском языке)*
3. *Жучков В.И., Садыков Т.О., Кайбышев Р.О. Шлаки и пыли ферросплавного производства // Русская металлургия (Металлы). 2020. № 5. С. 447–453 (на английском языке)*
4. *Выплавка мелкодисперсного феррохрома в печах постоянного тока / Отердум Х. [и др.] // Металлургические и материаловедческие трансакции В. 2024. Т. 55. С. 218–231 (на английском языке)*
5. *Ценное извлечение хрома из феррохромовых шлаков / Чжао Б. [и др.] // Металлы. 2024. Т. 14. № 2. С. 246 (на английском языке)*
6. *Влияние экструзии на физические свойства и выщелачиваемость хрома из феррохромовых шлаков / Дас С. [и др.] // Журнал устойчивой металлургии. 2022. Т. 8. С. 1457–1469 (на английском языке)*
7. *Хабаша Ф. Новейшие тенденции в металлургии: Квебек: Экстрактивная металлургия Квебека, 2007. 360 с. (на английском языке)*
8. *Обзор перспектив циркулярной экономики для шлаков нержавеющей стали / Холаппа Л. [и др.] // Журнал устойчивой металлургии. 2021. Т. 7. С. 1–18 (на английском языке)*
9. *Роллингс Д.Э. Минеральное извлечение с участием микроорганизмов и роль бактерий в экстракции металлов // Современные взгляды на биотехнологию. 2002. Т. 13. № 3. С. 255–261 (на английском языке)*
10. *Постановление правительства Республики Казахстан «Справочник по наилучшим доступным техникам «Производство ферросплавов». г. Астана, 27.12.2023 (на русском языке)*

Авторлар туралы мәліметтер:

Абилберікова А.А., «Қара және түсті металдар металлургиясы» ББ бойынша докторант, «Қарағанды индустриялық университеті» КЕАҚ (Теміртау қ., Қазақстан), a.abilberikova@tttu.edu.kz; <https://orcid.org/0000-0002-0133-3005>

Жұмағалиев Е.У., техн. ғылым. канд., «Металлургия және тау-кен ісі» кафедрасының меңгерушісі, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті КеАҚ (Ақтөбе қ., Қазақстан), uzhumagaliev@zhubanov.edu.kz; <https://orcid.org/0000-0003-2227-0661>

Уахитова Б.Т., Ph.D, «Металлургия және тау-кен ісі» кафедрасының доценті, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті КеАҚ (Ақтөбе қ., Қазақстан), Uakhitova_bt@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1156-8809>

Шабанов Е.Ж., Ph.D, «Металлургия және тау-кен ісі» кафедрасының профессоры, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті КеАҚ (Ақтөбе қ., Қазақстан), ushabanov@zhubanov.edu.kz; <https://orcid.org/0000-0001-6902-1211>

Information about the authors:

Abilberikova A., doctoral student of the EP «Metallurgy of ferrous and non-ferrous metals», «Karaganda industrial university» NCJSC (Temirtau, Kazakhstan)

Zhumagaliev E.U., Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Metallurgy and Mining, Aktobe Regional University named after K. Zhubanov NCJSC (Aktobe, Kazakhstan)

Uakhitova B.T., Ph.D, Associate Professor of the Department of Metallurgy and Mining, Aktobe Regional University named after K. Zhubanov NCJSC (Aktobe, Kazakhstan)

Shabanov E.Zh., Ph.D, Professor of the Department of Metallurgy and Mining, Aktobe Regional University named after K. Zhubanov NCJSC (Aktobe, Kazakhstan)

Сведения об авторах:

Абилберікова А.А., докторант ОП «Металлургия черных и цветных металлов», НАО «Карагандинский индустриальный университет» (г. Теміртау, Қазақстан)

Жұмағалиев Е.У., канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Металлургия и горное дело» НАО Ақтөбінского регионального университета им. К. Жубанова (г. Ақтөбе, Қазақстан)

Уахитова Б.Т., Ph.D, доцент кафедры «Металлургия и горное дело» НАО Ақтөбінского регионального университета им. К. Жубанова, (г. Ақтөбе, Қазақстан) Email:

Шабанов Е.Ж., Ph.D, профессор кафедры «Металлургия и горное дело» НАО Ақтөбінского регионального университета им. К. Жубанова (г. Ақтөбе, Қазақстан)