

МЕТАЛЛОТЕРМИЧЕСКОЕ ПОЛУЧЕНИЕ ХРОМ-НИКЕЛЕВЫХ ФЕРРОСПЛАВОВ: ВОЗМОЖНОСТИ, ПРЕИМУЩЕСТВА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

БИАХМЕТ А.Ж. , ЕСЕНГАЛИЕВ Д.А. 

*Биахмет Арсен Жанболатұлы - Магистрант, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, г. Ақтөбе, Қазақстан

E-mail: arsenbiahmet22@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-7074-2092>

Есенғалиев Даурен Амангелдіұлы - PhD, доцент кафедры «Металлургия и горное дело», Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, г. Ақтөбе, Қазақстан

E-mail: dyessengaliyev@zhubanov.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0009-0136-7422>

Аннотация. Металлотермическое получение хром-никелевых ферросплавов является перспективным направлением в современной металлургии, обеспечивающим высокую энергетическую эффективность и экономичность процесса. Данный метод основан на восстановлении оксидов хрома и никеля с использованием активных восстановителей, таких как алюминий или кремний, в результате чего выделяется значительное количество тепла, что позволяет проводить реакции без дополнительного электропитания. В работе рассматриваются возможности применения металлотермии для производства хром-никелевых ферросплавов с заданными химическими и физико-химическими характеристиками. Термодинамический анализ процессов восстановления оксидов хрома и никеля демонстрирует высокую эффективность их получения металлотермическим способом с использованием алюминия и кремния. Расчёты изобарно-изотермического потенциала $\Delta G(T)$ в широком температурном диапазоне показывают отрицательные значения для всех рассмотренных реакций, что подтверждает принципиальную возможность восстановления Cr_2O_3 и NiO без внешнего источника энергии. Алюминий обладает более высокой восстановительной способностью по сравнению с кремнием благодаря значительной энергии образования оксида Al_2O_3 . Реакции алюминотермии сопровождаются большим тепловыделением, что позволяет достичь температур, достаточных для расплавления металлической фазы и формирования шлакового расплава с низкой вязкостью. Силикотермия характеризуется меньшей термодинамической силой, однако обеспечивает целенаправленное легирование кремнием и возможность адаптации химического состава сплава. Термодинамические расчёты подтверждают устойчивую энергетическую базу металлотермического процесса и демонстрируют возможность гибкого управления составом конечного хром-никелевого ферросплава за счёт выбора восстановителя и шлакообразующей системы. Полученные выводы формируют основу для разработки технологических режимов производства комплексных сплавов из природных никель-содержащих руд, обеспечивая повышение энергоэффективности и качества конечного продукта.

Ключевые слова: никель, хром, металлотермия, восстановление, температура, руда, ферросплав.

Введение

Хром-никелевые ферросплавы занимают ключевую позицию среди легирующих материалов, применяемых при производстве коррозионностойких, жаропрочных и высоколегированных сталей. Рост мирового спроса на нержавеющие стали и сплавы специального назначения способствует интенсивному развитию технологий получения ферросплавов, обеспечивающих высокую степень извлечения хрома и никеля при оптимальных производственных затратах. Традиционные электроплавильные процессы характеризуются значительным энергопотреблением и предъявляют строгие требования к качеству исходного сырья, что ограничивает возможности их применения при переработке мелкодисперсных отходов и низкосортных руд [1-2].

Металлотермические методы восстановления оксидов хрома и никеля рассматриваются как перспективная альтернатива электротермическим процессам. Их преимущества заключаются в высокой интенсивности реакций, возможности локализации тепловыделения за счёт экзотермического характера металлотермических процессов, а также в расширении сырьевой

базы за счет вовлечения техногенных отходов металлургических производств. Применение активных восстановителей, таких как алюминий и кремний, позволяет достигать высоких температур, улучшать металл-шлаковые взаимодействия и способствовать повышенному извлечению ценных элементов в металлическую фазу [3-4].

Анализ современного состояния металлургических процессов получения хром-никелевых ферросплавов является актуальной задачей, направленной на формирование научно обоснованных подходов к внедрению энергосберегающих и экологически ориентированных технологий [5].



Рисунок 1 – Мировое производство никеля по странам

На рисунке 1 представлено распределение мирового производства никеля по ключевым добывающим странам. Показаны ориентировочные показатели за 2023 год (по данным открытых статистических источников: USGS, International Nickel Study Group) [6]. Абсолютным лидером является Индонезия, обеспечивающая свыше 1,6 млн тонн металла в год. Высокие объемы производства обусловлены активной разработкой латеритных руд, а также масштабным развитием металлургических проектов в рамках государственной стратегии углубления переработки и повышения добавленной стоимости продукции.

Значительный вклад в мировое производство никеля вносят также Филиппины и Россия, играющие важную роль в обеспечении стабильности сырьевых потоков на международных рынках. Новая Каледония, Канада, Австралия и Китай сохраняют заметную долю поставок благодаря наличию крупных рудных районов и развитой перерабатывающей инфраструктуры.

Анализ данных указывает на усиливающуюся зависимость мировой металлургии от стран Юго-Восточной Азии и подчеркивает необходимость освоения собственных никельсодержащих ресурсов в регионах с развитой металлургической базой, включая Казахстан [7].



Рисунок 2 – Оценка мировых запасов никеля по странам

На рисунке 2 использованы актуальные данные Геологической службы США (USGS) [6], отражающие оценку мировых запасов никеля на 2023 год. Диаграмма демонстрирует распределение разведанных запасов по основным добывающим странам. Лидирующие позиции занимают Индонезия и Австралия, каждая из которых располагает более чем 20 млн тонн никеля. Существенные ресурсы сосредоточены также в Бразилии и России, что обеспечивает устойчивость сырьевой базы и стабильность глобальной никелевой металлургии.

Филиппины, Канада, Китай и Новая Каледония обладают меньшей долей ресурсного потенциала, однако продолжают играть значимую роль в сырьевом обеспечении мировой никелевой индустрии. Анализ данных показывает, что ведущие производители никеля преимущественно используют латеритные руды, которые являются доминирующим типом никельсодержащего сырья в глобальном масштабе.

Мировое производство хрома и никеля базируется главным образом на добыче хромитовых и никелевых руд. Крупнейшие запасы хромита сосредоточены в ЮАР, Казахстане, Турции и Индии. На долю этих стран приходится более 75% мировых ресурсов Cr. Южная Африка занимает лидирующее положение по добыче и экспорту высококачественных хромитовых руд, обеспечивая потребности крупных ферросплавных производств.

Казахстан обладает значительным потенциалом для развития производства хром-никелевых ферросплавов благодаря наличию собственной минерально-сырьевой базы. Наиболее перспективными в этом отношении считаются месторождения Западного Казахстана, где сосредоточены значительные ресурсы никельсодержащих латеритных руд, среди которых особое место занимает месторождение Батамша (Актюбинская область) [8-10].

Руды Батамша имеют сложный минеральный состав и содержат, помимо никеля, хром, железо, магний и кремний. По данным геологоразведочных исследований, содержание никеля в руде составляет в среднем 0,8-1,2%, в то время как массовая доля оксидов хрома варьирует в пределах 1,5-4%, что открывает возможности для их комплексного извлечения [11-12].

Латеритный тип руд обуславливает нахождение никеля преимущественно в оксидной форме (NiO), тогда как хром представлен в виде Cr_2O_3 . Это делает возможным применение металлотермических методов восстановления с использованием алюминия, кремния либо их комбинации (Al+Si), что позволяет получать хром-никелевые сплавы без дорогостоящего электротермического передела.

Важным преимуществом является возможность интеграции переработки подобных руд в существующие металлургические мощности региона, в частности предприятия по производству феррохрома. Такой подход снижает затраты на логистику и энергоресурсы, а также способствует выпуску новых видов конкурентоспособной ферросплавной продукции.

Комплексное освоение Батамшинского сырья соответствует стратегическим задачам Казахстана и мировым тенденциям по расширению производства материалов для высоколегированных и коррозионностойких сталей.

Представленные данные подчёркивают актуальность развития технологий комплексного извлечения никеля и сопутствующих элементов, включая хром, что особенно важно для стран, обладающих собственными запасами латеритов, таких как Казахстан.

В мировой практике всё более актуальна реструктуризация сырьевой базы в сторону вторичных ресурсов. Значительный интерес представляют:

- пыль газоочистки и аспирации ферросплавных заводов;
- шламы и мелкие отходы после дробления руды;
- металлургические шлаки;
- промышленные хвосты обогащения.

Содержание Cr и Ni в таких материалах колеблется в пределах 10-55% и делает их

привлекательными для металлургической переработки, особенно при невозможности использования в электроплавильных агрегатах.

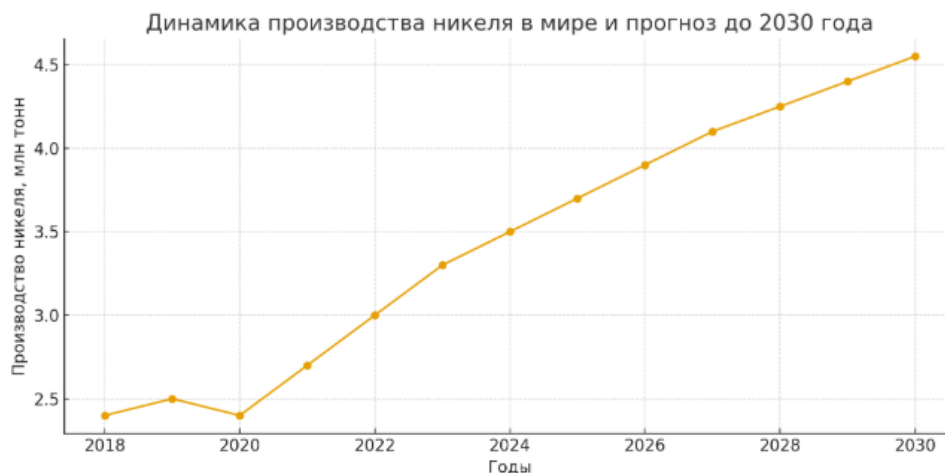


Рисунок 3 – Динамика производства никеля в мире и прогноз до 2030 года

На рисунке 3 представлена динамика мирового производства никеля за период 2018-2023 гг. и прогноз до 2030 года. Начиная с 2021 года наблюдается устойчивый рост выпуска никеля, что связано с расширением добычи латеритных руд в Индонезии и усилением спроса на металл со стороны аккумуляторной промышленности и производства нержавеющей стали.

По прогнозу, к 2030 году мировое производство никеля может превысить 4,5 млн тонн, что на 40-45% выше уровня 2022 года. Рост обусловлен:

- развитием металлургии высокого давления кислотного выщелачивания (HPAL);
- увеличением объемов переработки низкосортных латеритных руд;
- расширением программ электрификации и роста рынка литий-ионных аккумуляторов.

Таким образом, ожидаемое увеличение потребности в никеле подтверждает высокую стратегическую значимость разработки никельсодержащих ресурсов и совершенствования технологий получения высоколегированных ферросплавов, включая хром-никелевые сплавы.



Рисунок 4 – Среднегодовая цена никеля в мире

На рисунке 4 представлено изменение средней годовой цены на никель на мировом рынке за период 2018-2025 гг. Отмечается умеренный рост стоимости никеля до 2021 года, после чего

произошел резкий скачок цен в 2022 году, когда стоимость металла превысила 25 тыс. \$/т. Основные факторы, определившие эту тенденцию:

- дефицит металла на фоне активного роста производства аккумуляторов;
- нестабильность глобальных поставок и логистические ограничения;
- повышение инвестиционного интереса к сырью для энергетического перехода.

С 2023 года наблюдается частичная стабилизация ценового тренда, однако текущий уровень стоимости никеля остается значительно выше, чем в 2018-2020 гг. Прогнозируемое удержание цены на уровне 19-20 тыс. \$/т поддерживает высокую экономическую привлекательность вовлечения в переработку латеритных никельсодержащих руд, включая месторождения Казахстана.

Таким образом, представленные данные подтверждают стратегическую значимость расширения производства никеля и разработки технологий получения высоколегированных ферросплавов, в частности хром-никелевых, на основе местной минерально-сырьевой базы.

Материалы и методы исследования

Основы металлургических процессов восстановления хрома и никеля

Силикотермические процессы. Силикотермическое восстановление металлов из оксидов протекает по следующему типу реакции:



Восстановление оксидов кремнием проводят с использованием комплексных перерабатываемых ферросплавов. В силикотермических процессах в качестве кремнийсодержащих восстановителей применяют силикомарганец, ферросилиций, ферросилихром и другие сплавы, которые предварительно получают путём восстановления кремния из диоксида кремния, а также хрома и марганца из их оксидов углеродом. Таким образом, технологическая схема производства низкоуглеродистых ферросплавов включает стадию плавки перерабатываемых сплавов (ферросиликомарганца и ферросилихрома).

В производстве некоторых ферросплавов (FeW, FeMo, FeV и др.) в силикотермических процессах в качестве восстановителя применяется ферросилиций марок ФС75 или ФС65. В результате восстановления оксидов кремнием шлак обогащается диоксидом кремния. При этом невозможно достичь высокой степени восстановления основного элемента без снижения активность SiO_2 , поэтому плавку ведут по шлакообразующей технологии с использованием извести.

Кремний может применяться как восстановитель и в тех случаях, когда восстанавливаемые оксиды содержат элементы с большей химической сродством к кислороду по сравнению с кремнием. В подобных условиях удовлетворительный выход целевого металла достигается за счет введения избытка кремния в шихту. Получаемые продукты характеризуются повышенной концентрацией кремния, например силико-кальций, получаемый силикотермическим методом.

Благодаря высокой химической активности к кислороду кремний используется для восстановления элементов из таких оксидов, как Cr_2O_3 , MnO , MoO_3 , WO_3 , V_2O_5 и др. Восстановление оксидов кремнием сопровождается выделением тепла. Однако выделяемого тепла недостаточно для осуществления полностью автономного процесса вне печи, поэтому применяются электрические печи сравнительно небольшой мощности (2,5-7,0 МВА).

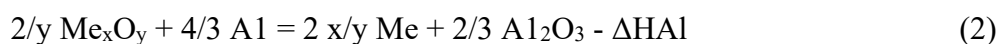
Кремний как восстановитель обладает рядом недостатков:

- Вследствие образования диоксида кремния увеличивается количество шлака. При этом активность SiO_2 возрастает, образуются устойчивые силикаты низших оксидов металла. Дальнейшее восстановление возможно только при введении в шихту основных оксидов.

- При температурах плавки ферросплавов кремний образует растворы с металлами, обладающие отрицательными отклонениями от свойств идеальных растворов. Это свидетельствует о прочности связей Me-Si и усложняет получение сплавов с низким содержанием кремния.

- В результате проведения силикотермического процесса формируются шлаки с основностью $\text{CaO/SiO}_2 \approx 2$, содержащие двухкальциевый силикат Ca_2SiO_4 (ларнит). При охлаждении таких шлаков при температуре около 675°C происходит фазовое превращение $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4 \rightarrow \gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$, сопровождающееся увеличением объема силикатов примерно на 11%. В результате шлак растрескивается и превращается в мелкодисперсную пыль. Такие мелкие шлаки затруднительно использовать в народном хозяйстве, они аккумулируются в отвалах и создают значительную экологическую нагрузку.

Алюминотермические процессы. Алюминотермическое восстановление металлов из их оксидов осуществляется по следующему типу реакции:



Восстановление оксидов алюминием сопровождается значительным выделением тепла. Основными особенностями алюминотермического процесса являются: высокая экзотермия реакций восстановления и возможность проведения плавки вне электрических печей без подвода дополнительной электроэнергии. При этом достигаются высокие температуры ($2400\text{-}2800\text{ K}$), превышающие температуру кристаллизации металла и шлака, что обеспечивает хорошее разделение фаз и высокую скорость процесса.

В алюминотермических процессах для восстановления металлов из их оксидов, как правило, не требуется дополнительный подвод тепла и использование электропечей. Исключение составляют случаи восстановления особо прочных оксидов (например, при получении ферросиликоциркония), когда плавку ведут в дуговых электрических печах.

Возможность самораспространяющегося алюминотермического процесса определяется тепловым эффектом реакции восстановления, теплоемкостью и теплопроводностью шихты и продуктов плавки, интенсивностью теплообмена с окружающей средой, а также теплотой образования металлической и шлаковой фаз. Главным условием самоподдерживаемости процесса является превышение теплового эффекта восстановления $Q_{\text{экз}}$ над суммарной потребностью в тепле для нагрева, плавления и обеспечения разделения фаз $Q_{\text{пл}}$, а также тепловых потерь $Q_{\text{пот}}$:

$$Q_{\text{экз}} > Q_{\text{пл}} + Q_{\text{пот}}.$$

Преимущества алюминотермических процессов:

- возможность восстановления большинства элементов, имеющих меньшую химическую сродство к кислороду, чем алюминий;
- получение ферросплавов с низким содержанием углерода и цветных примесей, а также высокочистых металлов;
- простота аппаратного оформления и низкие капитальные затраты;
- возможность проведения процесса в наклонных горнах с выпуском металла и шлака;
- возможность предварительного расплавления оксидов и шлакообразующих компонентов в электрической печи, что ускоряет процесс и снижает расход алюминия;
- возможность использования высокоглиноземистых шлаков для производства синтетических шлаков и высокоглиноземистого цемента.

Недостатки алюминотермии:

- высокая стоимость алюминия и ограниченность его ресурсов;
- вероятность образования низших оксидов восстанавливаемых элементов, что снижает термодинамическую эффективность восстановления и степень извлечения металла;
- образование высоковязких глиноземистых шлаков, которые затрудняют отделение металлической фазы и вызывают потери металла в виде «королёков».

Результаты и их обсуждения

Металлотермические процессы основаны на восстановлении оксидов металлов активными восстановителями с высокой химической сродством к кислороду. Для получения хрома и никеля из руд наиболее широко применяются алюминий и кремний. Реакции восстановления протекают с выделением значительного количества тепла, что обеспечивает автотермичность процесса и достижение температур до 2400-2600 °С, необходимых для формирования металлической расплавленной фазы.

Основные реакции восстановления оксидов хрома и никеля могут быть представлены следующим образом:

Восстановление хрома:



Восстановление никеля:



Приблизительный график $\Delta G(T)$ для реакций восстановления Cr и Ni (иллюстрация)

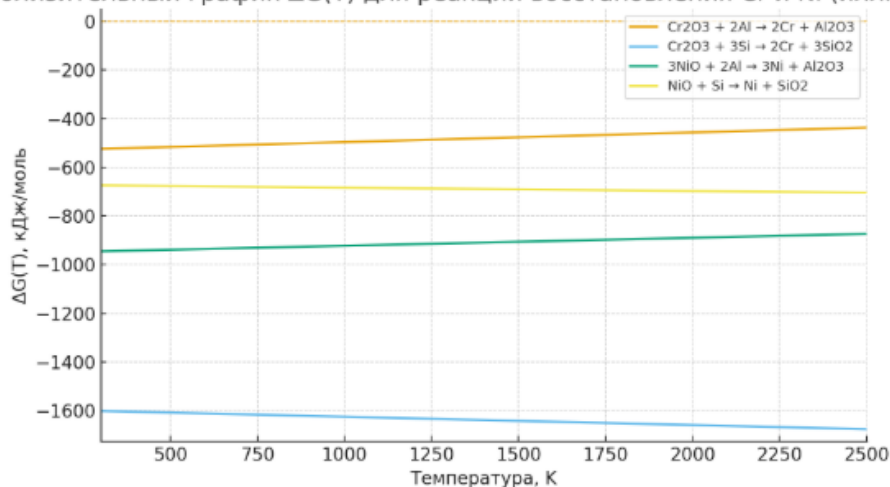


Рисунок 5 – График $\Delta G(T)$ для реакций восстановления Cr и Ni

На рисунке 5 показано изменение энергии Гиббса $\Delta G(T)$ основных восстановительных реакций в зависимости от температуры, что позволяет определить термодинамическую возможность протекания процессов восстановления оксидов металлов кремнием и алюминием. График построен по приближённым стандартным значениям ΔH°_{298} и S°_{298} . Во всем исследуемом температурном диапазоне (300-2500 K) значения ΔG имеют отрицательный характер, что подтверждает самопроизвольное течение восстановительных процессов как для хрома, так и для никеля.

Реакции алюминотермического восстановления отличаются наиболее отрицательными значениями ΔG , что указывает на их высокую термодинамическую предпочтительность по

сравнению с силикотермическими аналогами. Наиболее выгодной является реакция восстановления оксида хрома кремнием, демонстрирующая значительный энергетический драйв восстановления даже при низких температурах. Силикотермическое восстановление оксида никеля также протекает самопроизвольно, однако характеризуется меньшей величиной отрицательного ΔG в сравнении с алюминотермическим процессом.

Стабильные положения кривых относительно нулевого уровня ΔG свидетельствуют о широком температурном диапазоне реализации металлотермических процессов, что обеспечивает технологическую гибкость при получении хром-никелевых ферросплавов. Таким образом, анализ термодинамических зависимостей подтверждает перспективность применения алюминия и кремния в качестве эффективных восстановителей при производстве Cr-Ni-содержащих сплавов металлургическим способом.

Заключение

Термодинамический анализ процессов восстановления оксидов хрома и никеля указывает на высокую возможность их получения металлотермическим способом с использованием алюминия и кремния. Значения изменения изобарно-изотермического потенциала $\Delta G(T)$, рассчитанные в широком температурном диапазоне, демонстрируют отчетливо отрицательный характер для всех рассмотренных реакций. Это подтверждает принципиальную осуществимость восстановления Cr_2O_3 и NiO без применения внешнего источника энергии, что особенно важно для технологий автотермического типа.

Алюминий обладает более выраженной восстановительной способностью по сравнению с кремнием, что обуславливается высокой энергией образования оксида алюминия Al_2O_3 . В результате реакции алюминотермии происходят с большим тепловыделением, обеспечивая достижение температур, достаточных для расплавления металлической фазы и формирования шлакового расплава с низкой вязкостью. Силикотермия характеризуется меньшей термодинамической движущей силой, однако позволяет адаптировать химический состав сплава, обеспечивая целенаправленное легирование кремнием.

Оксиды хрома имеют большую термодинамическую устойчивость в сравнении с оксидом никеля. Следовательно, эффективное восстановление хрома требует более высоких температур и/или применения комбинированных восстановительных систем, включающих дополнительно алюминий или кальцийсодержащие добавки. Это обеспечивает снижение химической активности кремнезема в шлаке и повышает глубину восстановления Cr_2O_3 .

Таким образом, термодинамические расчеты подтверждают, что процесс получения хром-никелевых ферросплавов металлотермическим путем обладает устойчивой энергетической базой и позволяет гибко управлять составом конечного продукта за счет выбора восстановителя и шлакообразующей системы. Данные выводы служат основой для разработки технологических режимов получения комплексных сплавов из природных никель-содержащих руд.

Список литературы

1. Гальцов И. А., Прохоров В. В. Применение коррозионностойких высокохромистых сталей в сварных металлоконструкциях (обзор) // Научный альманах. – 2020. – №. 8-1. – С. 70-78.
2. Золотухин С. Е. и др. Исследование коррозионной стойкости нержавеющей хромоникелевых сталей и коррозионно-стойких никелевых сплавов в горячей концентрированной серной кислоте // Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Естественные науки». – 2023. – №. 6 (111). – С. 83-96.
3. Малык Н.П. Окисленные никелевые руды // Сб. науч. тр. - Л.: Гипроникель, 1962. Вып. 13. - С. 19-23.
4. Патент № 2092587 РФ. Способ переработки окисленных никельсодержащих материалов

// Дата регистрации 1998. Патентообладатель: АООТ «Южуралникель».

5. Вейзагер М.Л., Кормилицын С.П. Современные методы переработки окисленных никелевых руд за рубежом // Цветные металлы. - 1992. №6.0.11-17

6. Abdirashit, A.; Kelamanov, B.; Sariyev, O.; Yessengaliyev, D.; Abilberikova, A.; Zhuniskaliyev, T.; Kuatbay, Y.; Naurazbayev, M.; Nazargali, A. Study of Nickel–Chromium-Containing Ferroalloy Production. Processes 2025, 13, 1258. <https://doi.org/10.3390/pr13041258>

7. Kelamanov, B.; Yessengaliyev, D.; Sariyev, O.; Akuov, A.; Samuratov, Y.; Zhuniskaliyev, T.; Kuatbay, Y.; Mukhambetgaliyev, Y.; Kolesnikova, O.; Zhumatova, A.; et al. Technological Analysis of the Production of Nickel-Containing Composite Materials. J. Compos. Sci. 2024, 8, 179. <https://doi.org/10.3390/jcs8050179>

8. United States Geological Survey (USGS): <https://www.usgs.gov/> (дата обращения: 24.10.2025).

9. Extraction and Processing of Nickel-Cobalt Ores of the Kempirsai Group Deposits. Investment Proposals. Available online: <https://invest.gov.kz/ru/doing-business-here/invest-projects/29980/> (accessed on 13 January 2025).

10. Tolymbekov, M.Z.; Kelamanov, B.S.; Baisanov, A.S.; Kaskin, K.K. Processing Kazakhstan's chromonickel ore. Steel Transl. 2008, 38, 660–663.

11. Isatayev, K.K.; Seytimova, S.E.; Musayev, E.R. Prospects for the development of hard-to-enrich nickel ores in Kazakhstan. Min. J. Kazakhstan 2020, 2, 45–50.

12. Bepalov, V.P.; Yermekbayev, K.T. Technological problems of processing low-grade nickel ores and ways to solve them. Bull. KASU 2021, 3, 32–39.

References

1. Gal'cov I. A., Prohorov V. V. Primenenie korrozionnostojkih vysokohromistyh stalej v svarnyh metallokonstrukciyah (obzor) // Nauchnyj al'manah. – 2020. – №. 8-1. – S. 70-78.

2. Zolotuhin S. E. i dr. Issledovanie korrozionnoj stojkosti nerzhaveyushchih hromonikelevyh stalej i korrozionno-stojkih nikel'evyh splavov v goryachej koncentrirovannoj sernoj kislyote // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. NE Baumana. Seriya «Estestvennye nauki». – 2023. – №. 6 (111). – S. 83-96.

3. Malyk N.P. Okislennye nikel'evye rudy // Sb. nauch. tr. - L.: Gipronikel', 1962. Vyp. 13. - S. 19-23.

4. Patent № 2092587 RF. Sposob pererabotki okislennyh nikel'soderzhashchih materialov // Data registracii 1998. Patentoobladatel': АООТ «YUzhuralnikel'».

5. Veizager M.L., Kormilicyn S.P. Sovremennyye metody pererabotki okislennyh nikel'evyh rud za rubezhom // Cvetnye metally. - 1992. №6.0.11-17

6. Abdirashit, A.; Kelamanov, B.; Sariyev, O.; Yessengaliyev, D.; Abilberikova, A.; Zhuniskaliyev, T.; Kuatbay, Y.; Naurazbayev, M.; Nazargali, A. Study of Nickel–Chromium-Containing Ferroalloy Production. Processes 2025, 13, 1258. <https://doi.org/10.3390/pr13041258>

7. Kelamanov, B.; Yessengaliyev, D.; Sariyev, O.; Akuov, A.; Samuratov, Y.; Zhuniskaliyev, T.; Kuatbay, Y.; Mukhambetgaliyev, Y.; Kolesnikova, O.; Zhumatova, A.; et al. Technological Analysis of the Production of Nickel-Containing Composite Materials. J. Compos. Sci. 2024, 8, 179. <https://doi.org/10.3390/jcs8050179>

8. United States Geological Survey (USGS): <https://www.usgs.gov/> (дата обращения: 24.10.2025).

9. Extraction and Processing of Nickel-Cobalt Ores of the Kempirsai Group Deposits. Investment Proposals. Available online: <https://invest.gov.kz/ru/doing-business-here/invest-projects/29980/> (accessed on 13 January 2025).

10. Tolymbekov, M.Z.; Kelamanov, B.S.; Baisanov, A.S.; Kaskin, K.K. Processing Kazakhstan's chromonickel ore. Steel Transl. 2008, 38, 660–663.

11. Isatayev, K.K.; Seytimova, S.E.; Musayev, E.R. Prospects for the development of hard-to-enrich nickel ores in Kazakhstan. Min. J. Kazakhstan 2020, 2, 45–50.

12. Bepalov, V.P.; Yermekbayev, K.T. Technological problems of processing low-grade nickel ores and ways to solve them. Bull. KASU 2021, 3, 32–39.

ХРОМ-НИКЕЛЬ ФЕРРОКОРЫТПАЛАРЫН МЕТАЛЛОТЕРМИЯЛЫҚ ӨНДІРУ: МҮМКІНДІКТЕРІ, АРТЫҚШЫЛЫҚТАРЫ ЖӘНЕ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

БИАХМЕТ А.Ж. , ЕСЕНГАЛИЕВ Д.А. 

*Биахмет Арсен Жанболатұлы - Магистрант, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан

E-mail: arsenbiahmet22@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-7074-2092>

Есенгалиев Даурен Амангелдіұлы - PhD, «Металлургия және тау-кен ісі» кафедрасының доценті, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан

E-mail: dyessengaliyev@zhubanov.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0009-0136-7422>

Андатпа. Хром-никель феррокорытпаларын металлотермиялық өндіру үрдістің жоғары энергетикалық тиімділігі мен үнемділігін қамтамасыз ететін қазіргі металлургиядағы перспективалы бағыт болып табылады. Бұл әдіс алюминий немесе кремний сияқты белсенді тотықсыздандырғыштарды қолдана отырып, хром мен никель оксидтерін тотықсыздандыруға негізделген, нәтижесінде жылу көп мөлшерде бөлінеді, бұл реакцияларды қосымша электрмен қамтамасыз етуді жүргізуге мүмкіндік береді. Жұмыста берілген химиялық және физика-химиялық сипаттамалары бар хром-никель феррокорытпаларын өндіру үшін металлотермияны қолдану мүмкіндіктері қарастырылады. Хром мен никель оксидтерінің тотықсыздану үрдістерінің термодинамикалық талдауы оларды алюминий мен кремнийдің көмегімен металлотермиялық жолмен алудың жоғары тиімділігін көрсетеді. Кең температура диапазонындағы $\Delta G(T)$ изобар-изотермиялық потенциалын есептеу барлық қарастырылған реакциялар үшін теріс мәндерді көрсетеді, бұл Cr_2O_3 және NiO -ны сыртқы энергия көзінсіз қалпына келтірудің негізгі мүмкіндігін растайды. Алюминий Al_2O_3 оксидінің айтарлықтай түзілу энергиясының арқасында кремниймен салыстырғанда жоғары тотықсыздану қабілетіне ие. Алюминий термиялық реакциялар үлкен жылу шығарумен бірге жүреді, бұл металл фазасын балқыту және тұтқырлығы төмен қож балқымасын қалыптастыру үшін жеткілікті температураға қол жеткізуге мүмкіндік береді. Силикотермия аз термодинамикалық күшпен сипатталады, бірақ ол кремниймен мақсатты легірлеуді және қорытпаның химиялық құрамын бейімдеу мүмкіндігін қамтамасыз етеді. Термодинамикалық есептеулер металлотермиялық үрдістің тұрақты энергетикалық базасын растайды және тотықсыздандырғыш пен қож түзетін жүйені таңдау арқылы соңғы хром-никель феррокорытпасының құрамын икемді басқару мүмкіндігін көрсетеді. Алынған тұжырымдар соңғы өнімнің энергия тиімділігі мен сапасын арттыруды қамтамасыз ете отырып, құрамында табиғи никель бар кендерден кешенді қорытпаларды өндірудің технологиялық режимдерін әзірлеуге негіз болады.

Түйін сөздер: никель, хром, металлотермия, тотықсыздандыру, температура, кен, феррокорытпа.

METALLOTHERMAL PRODUCTION OF CHROMIUM-NICKEL FERROALLOYS: OPPORTUNITIES, ADVANTAGES AND TECHNOLOGICAL FEATURES

BIAKHMET A.ZH. , YESSENGALIYEV D.A. 

*Biakhmet Arsen Zhanbolatuly - Master's student, Aktobe Regional University named after K. Zhubanov, Aktobe, Kazakhstan

E-mail: arsenbiahmet22@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-7074-2092>

Yessengaliyev Dauren Amangeldiuly - PhD, associate professor of the Department «Metallurgy and mining», Aktobe Regional University named after K. Zhubanov, Aktobe, Kazakhstan

E-mail: dyessengaliyev@zhubanov.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0009-0136-7422>

Abstract. Metallothermal production of chromium-nickel ferroalloys is a promising area in modern metallurgy, providing high energy efficiency and cost-effectiveness of the process. This method is based on the reduction of chromium and nickel oxides using active reducing agents such as aluminum or silicon, resulting in a significant amount of heat, which allows reactions to be carried out without additional power supply. The paper considers the possibilities of using metallothermy for the production of chromium-nickel ferroalloys with specified chemical and physico-chemical characteristics. Thermodynamic analysis of the reduction processes of chromium and nickel oxides demonstrates the high efficiency of their production by the metallothermal method using aluminum and silicon. Calculations of the isobaric-isothermal potential $\Delta G(T)$ over a wide temperature range show negative values for all the reactions considered, which confirms the fundamental possibility of reducing Cr_2O_3 and NiO without an external energy source. Aluminum has a higher reducing ability compared to silicon due to the significant energy of formation of Al_2O_3 oxide. Aluminothermy reactions are accompanied by high heat release, which makes it possible to reach temperatures sufficient for the melting of the metal phase and the formation of a low-viscosity slag melt. Silicothermy is characterized by a lower thermodynamic force, however, it provides targeted doping with silicon and the ability to adapt the chemical composition of the alloy. Thermodynamic calculations confirm the stable energy base of the metallothermal process and demonstrate the possibility of flexibly controlling the composition of the final chromium-nickel ferroalloy by selecting a reducing agent and a slag-forming system. The findings form the basis for the development of technological modes for the production of complex alloys from natural nickel-containing ores, providing increased energy efficiency and quality of the final product.

Key words: nickel, chromium, metallothermy, reduction, temperature, ore, ferroalloy.