

## О Т З Ы В

официального оппонента доктора технических наук Садыхова Гусейнгулу Бахлул оглы на диссертацию Рябушкина Максима Игоревича на тему: «Развитие технологии получения никелевого порошка трубчатых печей для последующей его переработки путем хлорного выщелачивания и электроэкстракции никеля», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности «2.6.2. Metallургия чёрных, цветных и редких металлов»

### Актуальность темы диссертации

Группа компаний «Норильский никель» является крупнейшим в мире производителем никеля, палладия, платины и других металлов. В 2019 году на АО «Кольская ГМК» для получения катодного никеля была реализована новая более современная технология хлорного выщелачивания никелевого порошка с последующим электролизом раствора с нерастворимыми анодами. Эта технология характеризуется меньшими операционными издержками, более высоким извлечением ценных компонентов, улучшением качества катодного металла и меньшей экологической нагрузкой на окружающую среду.

Однако в процессе работы новой технологии были выявлены проблемы, связанные с нестабильностью состава никелевого порошка, поступающего на выщелачивание. Установлено, что для достижения высоких показателей при хлорном выщелачивании никелевый порошок, наряду с высокой степенью металлизации, должен соответствовать определенным критическим требованиям по гранулометрическому составу и реакционной активности металлического никеля, по содержанию  $\text{SiO}_2$ , С и других примесей. Для устранения этих недостатков необходимо было провести оценку действующих на предприятии «Кольская ГМК» следующих технологических операций: окислительный обжиг сульфидного никелевого концентрата в печах кипящего слоя; восстановительный обжиг никелевого огарка в трубчатой вращающейся печи; магнитная сепарация металлизированного продукта. В результате необходимо было выявить причины получения никелевого порошка ненадлежащего качества и разработать рациональные технические решения для улучшения его технологических свойств, требуемых при последующем хлорном выщелачивании.

Учитывая вышеизложенное, диссертационная работа Рябушкина Максима Игоревича «Развитие технологии получения никелевого порошка трубчатых печей для последующей его переработки путем хлорного выщелачивания и электроэкстракции никеля» является

ОТЗЫВ  
ВХ. № 9-564 от 13.12.24  
АУ УС

весьма актуальной и имеет важное значение как для науки, так и для развития действующей технологии производства никеля на Кольском горно-металлургическом комбинате.

### **Научная новизна диссертации**

Определены причины накопления в никелевом порошке наиболее нежелательной примеси – диоксида кремния, который в качестве силикатной связки способствует сцеплению металлических частиц с образованием конгломератов в условиях восстановительного обжига огарка никелевого концентрата в трубчатых вращающихся печах, что приводит к заметному ухудшению реакционной способности полученного никелевого порошка при хлорном выщелачивании.

Выявлен механизм образования с участием диоксида кремния спеченных конгломератов при восстановительном обжиге, определена взаимосвязь гранулометрического состава конгломератов и их прочности с параметрами процесса.

Установлено, что осуществление окислительного обжига сульфидного никелевого концентрата в печи КС в области температур 1050-1080°C, которая обеспечивается при поддержании содержания серы в концентрате не менее 17%, и снижении на 10% расхода твердого восстановителя при последующем восстановительном обжиге окисленного никелевого концентрата во вращающейся трубчатой печи максимально ограничивают процессы спекания и позволяют получить при магнитной сепарации никелевый порошок с заданными технологическими свойствами.

**Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается их соответствием современным представлениям о механизме физико-химических процессов, протекающих при последовательных окислительном и восстановительном обжиге сульфидного никелевого концентрата с последующим разделением металлизированного концентрата на магнитную и немагнитную фракции, применением современных методов исследований, оборудования и программного обеспечения, а также соответствием результатов моделирования и лабораторных исследований результатам, полученным в ходе опытно-промышленных и промышленных испытаний.

### **Научные результаты, их ценность**

Результаты исследований докладывались на международных научных и научно-практических конференциях: "MELTS" в Екатеринбурге 2021 году, «Российская наука в современном мире» Москва 2024 г, «Научно-технический прогресс: информация,

технологии, механизм», Стерлитамак 2024 г, а также докладывались на заседаниях НТС ПАО «ГМК «Норильский Никель», АО «Кольская ГМК», 2020-2023 гг. и на научных семинарах ООО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург 2023 г.

Основные результаты диссертации приведены в 9 научных работах, в том числе в 5 статьях, опубликованных в журналах, входящих в международную базу данных и системы цитирования Scopus. Получен 1 патент.

Диссертационная работа направлена на решение весьма актуальной производственной задачи по совершенствованию действующей технологии производства никеля по схеме «хлорное выщелачивание - электроэкстракция» на Кольском горно-металлургическом комбинате. В рамках данной работы был проведён комплекс теоретических и экспериментальных исследований технологических процессов последовательных операций окислительного обжига сульфидного никелевого концентрата, восстановительного обжига окисленного никелевого концентрата и магнитной сепарации металлизированного продукта с получением никелевого порошка с высокой реакционной способностью при его хлорном выщелачивании. Полученные результаты проверены на опытно-промышленных и промышленных испытаниях. Выполнена технико-экономическая оценка сравнительной экономической эффективности реализации проекта модернизации передела получения качественного никелевого порошка с высокой химической активностью в рафинировочном цехе Кольского ГМК.

### **Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации**

Теоретическая значимость работы заключается в установлении зависимости тепловых эффектов процессов окислительного обжига сульфидного никелевого концентрата и восстановительного обжига никелевого огарка от исходных технологических параметров на основе термодинамического моделирования, в выявлении механизма образования спеченных конгломератов при восстановительном обжиге огарка в трубчатых вращающихся печах, а также в определении зависимости эффективности магнитной сепарации никелевого порошка и содержания в нем диоксида кремния и углерода от крупности исходного питания, величины магнитной индукции и частоты вращения барабана сепаратора.

На основании установленного механизма накопления в технологической схеме диоксида кремния, приводящего к многократному увеличению его концентрации в никелевом порошке и росту выхода остатка хлорного растворения, разработаны мероприятия и определен канал вывода ряда оборотных материалов из технологической схемы производства никеля.

В результате промышленных испытаний восстановительного обжига огарка в трубчатых вращающихся печах установлено, что расход угля может быть снижен на 10% с экономическим эффектом 18,484 млн. руб./год.

Разработана новая технологическая схема участка магнитной сепарации, позволяющая увеличить извлечение никеля в никелевый порошок с 98,3 до 99,9% и снизить его потери на 359 т/год. Результаты исследований реализованы на производстве, что подтверждается двумя актами о внедрении от 01.12.2023 г. (приложение А).

### **Рекомендации по использованию результатов работы**

Результаты диссертационной работы могут быть успешно использованы для переработки сульфидных никелевых концентратов, полученных из другого вида никельсодержащего сырья, в частности из окисленных никелевых руд гидро- и пирометаллургическими способами.

### **Замечания и вопросы по работе**

1. Для лучшего восприятия материала в литературном обзоре целесообразно было бы сначала дать описание состояния производства никеля на Кольском ГМК, а потом указать на конкретные технологические проблемы, решение которых позволит существенно улучшить технико-экономические показатели производства металлического никеля по новой технологии.

2. В диссертационной работе не приводятся данные по содержанию платиновых металлов в сульфидном никелевом концентрате, по распределению их между разными фракциями при переработке этого концентрата с получением катодного никеля через хлорное выщелачивание никелевого порошка.

В старой технологии получения катодного никеля через анодное растворение содержащиеся в сульфидном никелевом концентрате платиновые металлы практически полностью концентрируются в анодном шламе. В новой технологии картина процесса кардинально меняется, так как в ней отсутствуют конкретные узлы концентрирования благородных металлов. Платиновые металлы, содержащиеся в никелевом концентрате, при магнитной сепарации металлизированного никелевого концентрата будут распределены между магнитной и немагнитной фракциями, а при хлорном выщелачивании никелевого порошка (магнитной фракции) - между твердой и жидкой фазами. Согласно описанию технологии, полученный раствор хлорида никеля перед электролизом подвергается очистке от примесей меди, железа, кобальта и цинка. При этом возникают вопросы о решении

проблемы полноты извлечения из никелевого концентрата платиновых металлов при производстве катодного никеля по новой технологии.

3. В работе при описании объектов исследований, продуктов отдельных переделов и процессов автором часто используется условно принятая в производстве терминология. Например: для огарка окислительного обжига сульфидного никелевого концентрата используется название закись никеля, для продукта восстановительного обжига огарка - восстановленная закись никеля и т.д. Эти названия не всегда четко характеризуют свойства объекта, такие как его происхождение и наследственные связи между перерабатываемыми материалами и целевыми продуктами отдельных технологических переделов производственного цикла. Учитывая то, что диссертация является научной работой и рассчитана на широкий круг специалистов научного сообщества, а не только на коллектив конкретного производства, корректно было бы использование общепринятых научных терминов. Считаю, что исходный никелевый концентрат и продукты его переработки по рассматриваемой в диссертации технологической схеме целесообразно было бы называть в следующем порядке:

- никелевый концентрат от разделения фанштейна - сульфидный никелевый концентрат;
- продукт окислительного обжига сульфидного никелевого концентрата – окисленный никелевый концентрат;
- продукт восстановительного обжига окисленного никелевого концентрата – металлизированный никелевый концентрат;
- продукт очистки металлизированного никелевого концентрата от нежелательных примесей путем измельчения и магнитной сепарации (магнитная фракция) – никелевый порошок;
- немагнитная фракция – хвосты магнитной сепарации.

Полученный никелевый порошок в дальнейшем поступает на процесс растворения под названием «хлорное выщелачивание». Следует отметить, что в хлорном выщелачивании не происходит непосредственного взаимодействия между металлическим никелем и хлором. Растворение никеля идет по двухстадийному механизму. Сначала происходит взаимодействие хлора с водой с образованием гипохлорит ( $\text{ClO}^-$ )- и хлорид ( $\text{Cl}^-$ )-ионов, т.е. хлорноватистой и соляной кислот. На второй стадии гипохлорит-ионы окисляют атомы никеля с последующим связыванием катионов никеля с хлорид-ионами в хлорид никеля. Поэтому для данного процесса более приемлемо использование названия «гидрохлорирование». Хлорная вода является хорошим растворителем благородных металлов (за исключением серебра). Благодаря этому, способ «гидрохлорирование»

применяется для извлечения благородных металлов из минерального и техногенного сырья определенного состава.

В работе выделенный при хлорном выщелачивании никелевого порошка нерастворимый остаток называется продуктом хлорного растворения (стр. 71) или продуктом гидрометаллургического передела (стр. 73). В данном случае лучше назвать его твердым остатком хлорного выщелачивания или гидрометаллургического передела. Основным продуктом хлорного выщелачивания является раствор хлорида никеля, а попутными продуктами - выделенные при очистке раствора от меди, кобальта и цинка соответствующие концентраты.

4. В тексте диссертации присутствуют часто повторяющиеся сочетания слов, речевые обороты и целые предложения, расположенные очень близко друг к другу на одной странице. Например: на стр. 80 и 83 в разделе 4.2.3.

5. В диссертации при оформлении подрисуночных подписей для большинства рисунков, на которых изображены микроструктуры порошков и конгломератов, сначала приводятся обозначения по детализации структуры или элементов рисунка, а затем его номер и название. В научных трудах и публикациях в подрисуночных подписях принято сначала указывать номер и название рисунка, затем – необходимые обозначения.

На рис. 4.5 (стр. 63) упущены некоторые цифровые обозначения: 2", 4", 7", 8", 14".

### **Заключение по диссертации**

В целом сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертация выполнена на высоком научном уровне и представляет собой законченную научно-квалификационную работу. Она содержит сведения, представляющие интерес для специалистов в области химии и металлургии, и направлена на решение актуальной производственной задачи – повышение технико-экономических показателей производства никеля на крупнейшем комбинате страны. Диссертация и автореферат содержат требуемые разделы и соответствуют друг другу.

Считаю, что диссертация «Развитие технологии получения никелевого порошка трубчатых печей для последующей его переработки путем хлорного выщелачивания и электроэкстракции никеля», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.2. – Металлургия черных, цветных и редких металлов, полностью отвечает требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины

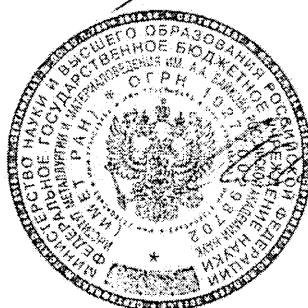
П», утвержденного приказом ректора Санкт-Петербургского горного университета Екатерины II от 20.05.2021 № 953 адм, а ее автор Рябушкин Максим Игоревич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов.

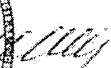
Официальный оппонент,  
заведующий лабораторией  
«Проблем металлургии комплексных  
руд имени академика И.П. Бардина»  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Института  
металлургии и материаловедения  
им. А.А. Байкова Российской академии наук  
(ИМЕТ РАН), д.т.н., гл.н.с.



Садыхов Гусейнгулу Бахлул оглы  
02.12.2024 г.

Подпись оппонента Садыхова Г.Б. заверяю:  
Ученый секретарь ИМЕТ РАН, к.т.н.



 О.Н. Фомина

**Сведения об официальном оппоненте:**  
Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки Институт  
металлургии и материаловедения  
им. А.А. Байкова Российской академии наук  
(ИМЕТ РАН)  
119334 г. Москва, Ленинский проспект, д.49  
Тел.: + 7 (499) 135-20-60  
E-mail: [imet@imet.ac.ru](mailto:imet@imet.ac.ru)

