

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук **Шепелева Игоря Иннокентьевича**
на диссертацию **Шопперта Андрея Андреевича** «Теоретические основы и
технология комплексной переработки бокситов с использованием
восстановительного выщелачивания в цикле Байера», представленную на
соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.2.
Металлургия черных, цветных и редких металлов

Диссертационная работа Шопперта А.А. посвящена разработке теоретических основ и технологии переработки бокситов с использованием восстановительного выщелачивания, что позволяет переводить основные железосодержащие минералы боксита в магнетит, повысить извлечение алюминия, снизить выход красного шлама. Получение богатого по железу красного шлама и его магнитные свойства могут служить предпосылками для создания комплексной переработки бокситов. Особенностью данной работы является глубокое изучение фазового состава исходного сырья и применение гидрометаллургического низкотемпературного способа трансформации соединений железа в магнетит с использованием в том числе процесса электролиза. Такой метод позволяет перерабатывать любой вид бокситового сырья непосредственно в цикле Байера с образованием кондиционного красного шлама, пригодного для дальнейшей переработки.

Актуальность темы диссертации

Основным методом получения глинозема во всем мире остается способ Байера, который был разработан уже более 100 лет назад для переработки бокситов путем щелочного гидрометаллургического извлечения алюминия из высококачественного глиноземсодержащего сырья с низким содержанием кремнезема, где кремневый модуль (массовое отношение Al_2O_3 к SiO_2) составляет не менее 7 ед.

При выщелачивании бокситов по способу Байера вместе с алюминием на первой стадии в щелочно-алюминатный раствор также переходит и кремний. Затем растворенный кремний взаимодействует с алюминатными ионами ($\text{Al}(\text{OH})_4^-$) с образованием продукта обескремнивания – гидроалюмосиликата натрия (ГАСН , $\text{Na}_6[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}] \cdot \text{Na}_2\text{X}$, где X представляет собой различные неорганические анионы, чаще всего сульфатные, карбонатные, хлоридные, алюминатные и т.д.). Для снижения потерь каустической щелочи и исключения образования пленок титаната натрия при переработке бокситов используют известь, что приводит к значительному увеличению выхода красного шлама и повышает потери алюминия.

Потери каустической щелочи и алюминия при образовании ГАСНа определяют экономическую эффективность переработки боксита по способу Байера. Бокситы с кремневым модулем менее 7 ед. и тем более алюмосиликатное сырье, где отношение Al_2O_3 к SiO_2 менее 1, с этой точки зрения экономически выгоднее перерабатывать по способу спекания, где кремнезем связывается с кальцием в двухкальциевый силикат при температурах более 1100 °С, что приводит к существенному повышению энергозатрат и дальнейшему увеличению выхода красного шлама, который может оказывать пагубное воздействие на окружающую среду (г. Айка, Венгрия, 2010 г.).

Следствием образования ГАСНа и искусственного введения извести являются снижение содержания железа в красном шламе (до 35 %), повышенный расход каустической щелочи (до 100 кг/т глинозема), низкое извлечение глинозема – не более 85–90 %, а значит и его повышенное содержание в красном шламе – до 10–15 %. Как следствие образующийся по существующей технологии Байера красный шлам оказывается непригоден для извлечения из него ценных компонентов, в том числе редкоземельных, содержание которых в красном шламе в несколько раз превышает среднее значение для земной коры.

Таким образом, **актуальность работы** заключается в необходимости теоретического обоснования технологии переработки бокситов и разработки новых способов, которые позволили бы исключить образование ГАСНа и тем самым значительно снизить объем образующегося красного шлама, который при этом мог бы быть пригодным для дальнейшей переработки.

Научная новизна

1. В работе показана возможность низкотемпературной магнетизации (перевода в магнетит) основных железосодержащих минералов, входящих в состав различных бокситов, путем атмосферного выщелачивания раствором с концентрацией более 330 г/дм³ Na_2O в присутствии соединений железа (II) или за счет электролитического восстановления. Установлено, что при этом достигается полная магнетизация алюмогетита и алюмогематита, которые вскрываются в процессе Байера только при температурах более 240 °С.

2. На основании кинетических исследований впервые показано, что при восстановительном выщелачивании растворение гидроксидов алюминия, извлечение алюминия из алюмогетита и алюмогематита протекают в кинетической режиме, а из продуктов обескремнивания раствора – в диффузионном режиме, что подтверждается выведенными уравнениями на основе модели сжимающегося ядра.

3. Доказана возможность полного растворения бемита в процессе атмосферного выщелачивания предварительно обескремненного в присутствии железа (II) боксита Средне Тиманского месторождения (СТБР). Показано, что в

результате выщелачивания образуется магнетитовый красный шлам с повышенным содержанием редкоземельных элементов и железа.

4. Выявлено, что при восстановительном выщелачивании боксита с использованием электролиза в водных растворах каустической щелочи и обратном растворе процесса Байера в зависимости от условий проведения электролитического восстановления железосодержащих минералов боксита возможно получение как элементного железа, так и магнетита.

5. Обоснован механизм электролитического восстановления железосодержащих минералов с использованием компактного образца боксита. Выявлено, что процесс восстановления может протекать как твердофазно, так и за счет восстановления находящихся в растворе гидроксокомплексов железа. Взаимодействие гидроксокомплексов железа (II) с гематитом также может приводить к образованию магнетита.

6. Установлено, что использование активной затравки с поверхностью более 30 м²/г позволяет снять диффузионные ограничения и ускорить процесс разложения щелочно-алюминатного раствора в несколько раз, что может быть использовано для получения высокомолекулярного щелочно-алюминатного раствора, необходимого для повышения эффективности электролитического восстановления железосодержащих минералов боксита.

Теоретическая и практическая значимость работы

Совокупность полученных в работе данных позволяет расширить и углубить теоретические основы процессов восстановительного выщелачивания различных видов бокситов с получением кондиционного красного шлама.

Полученные в результате исследования научные и практические данные могут служить фундаментальной основой для разработки нового способа переработки бокситов с использованием электролитического восстановления минералов железа.

Разработана, апробирована в опытно-промышленных масштабах и планируется к внедрению технология с применением активной затравки для повышения степени разложения раствора при одновременной стабилизации гранулометрического состава продукта на заводах АО «РУСАЛ Урал».

Степень обоснованности и апробация результатов

Исследования выполнены в лабораторном, укрупненно-лабораторном и опытно-промышленном масштабах. Используются методы планирования эксперимента, математического моделирования, пакеты компьютерных программ управления, сбора данных и обработки результатов с применением искусственных нейронных сетей.

Для описания кинетики гетерогенных реакций с участием непористых материалов применены модели сжимающегося ядра.

Исследование трансформации железосодержащих минералов в ходе восстановительного выщелачивания изучалось с применением мёссбауэровской спектроскопии.

При анализе исходных материалов, промежуточных и конечных продуктов изучаемых процессов использовали аттестованные физико-химические методы: рентгенофлуоресцентной спектроскопии (РФюА – Axios MAX, Panalytical), рентгенофазового анализа (РФА – Difrei-401, АО "Научные приборы"), масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС - NexION 300S, PerkinElmer), сканирующей микроскопии (СЭМ – Vega 3, TESCAN) с приставкой для энергодисперсионного спектрального анализа (ЭДС – приставка INCA Energy 450, OXFORD instruments) и т.д.

Достоверность научных результатов подтверждается апробацией основных положений диссертации в публикациях и выступлениях автора на научных конференциях.

Предложения по расширенному использованию

Материалы диссертации представляют интерес для специалистов отечественной глиноземной промышленности - Богословский алюминиевый завод и Уральский алюминиевый завод, для сотрудников научно-инженерных подразделений компании РУСАЛ, а также для студентов металлургических специальностей.

Оценка содержания диссертационной работы

Диссертация состоит из оглавления, введения, 6 глав с выводами по каждой из них, заключения и списка литературы, включающего 253 наименований. Диссертация изложена на 284 страницах машинописного текста, содержит 48 рисунков и 31 таблицу. Структурно разделы в представленной на соискание диссертации располагаются логично и последовательно. Материалы диссертации представлены на международных и всероссийских конференциях, а также достаточно полно опубликованы в научных журналах и сборниках. Основные результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 42 научных работах, из них 22 статьи – в изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ и входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus; подана заявка на патент РФ на изобретение.

Вопросы и замечания по диссертационной работе Шопперта А.А.:

1. В 3 главе (стр.104-119 диссертации) показано, что при предварительном обескремнивании боксита Среднего Тимана в растворах с концентрацией Na_2O

более 330 г/дм³ происходит полное вскрытие шамозита, который в свою очередь сам может служить источником двухвалентного железа Fe (II). Не проводилась ли в работе оценка вклада шамозита в общую степень восстановления соединений железа или возможность восстановления гематита только за счет шамозита?

2. Восстановительное выщелачивание с добавлением железа Fe (II) изучалось как для бемитовых, так и для гиббситовых бокситов. В 4 главе исследования показаны только для бемитового боксита. Возможно ли использовать электролитическое восстановление для гиббситовых бокситов?

3. Эффективность использования электрического тока в работе проводится только на основании весового и химического анализов продуктов реакции. Следовало бы оценить также и выход водорода на катоде и кислорода на аноде.

4. В 5 главе (стр.196 - 220 диссертации) исследования по декомпозиции алюминатных растворов проводились при фиксированном каустическом модуле 1,71 ед. Как поведет себя активная затравка в промышленных условиях, где модуль постоянно изменяется?

5. В приложении к диссертации включен акт внедрения, но фактически это акт опытно – промышленных испытаний, так как в нем приводится информация, что результаты разработанной соискателем технологии получения активного затравочного гидроксида алюминия только планируются к внедрению на перделе декомпозиции глиноземного производства и не указываются даты планируемого внедрения.

Перечисленные выше замечания в целом носят дискуссионный характер, не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и не снижают ее практической и научной ценности.

Соответствие паспорту специальности

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.6.2. Metallургия чёрных, цветных и редких металлов по пункту 4 «Термодинамика и кинетика металлургических процессов» и пункту 7 «Рециклинг материалов, переработка отходов производства и потребления».

Заключение по диссертации

Диссертация «Теоретические основы и технология комплексной переработки бокситов с использованием восстановительного выщелачивания в цикле Байера», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.2. Metallургия чёрных, цветных и редких металлов отвечает требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО «Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Шопперт


Андрей Андреевич – заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.2. Metallургия чёрных, цветных и редких металлов.

Официальный оппонент:

Директор Общества с ограниченной ответственностью
«Экологический Инжиниринговый Центр»,
доктор технических наук
(специальность 02.00.04 – Физическая химия,
технические науки)

 _____ **Шепелев Игорь Иннокентьевич**

662150, Красноярский край, г. Ачинск, ОПС, а/я 27;
(39151) 2-33-77; 8 9233075644, E-mail: ekoing@mail.ru
20 ноября 2023 г.

Подпись доктора технических наук Шепелева И.И. заверяю
Начальник отдела кадров  _____ А.П. Матвеева

