

С использованием ВДЭ отмечено повышение предельного тока при ускорении вращения, с горизонтальным участком в $-1,6...-1,8$ В, типичным для диффузионного режима. График $1/i$ vs $1/\omega$ прямолинеен ($R^2 \approx 0,999$), указывая на смешанный контроль. Коэффициенты $D_{Sn} \approx 1,77 \times 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$ и $D_{Zn} \approx 1,97 \times 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$ меньше стандартных для свободных ионов вследствие комплексообразования (станнаты, цинкаты) и влияния добавок [3]. Более высокие обороты увеличивают долю Zn, благодаря оптимизации переноса массы [4].

Анализ подтвердил комбинированный диффузионно-кинетический характер нанесения Sn-Zn, с облегчением осаждения Zn и ограничениями для Sn. Водородная реакция усиливается ниже $-1,8$ В, снижая выход по току. Эти выводы способствуют корректировке режимов для слоев с заданным составом и усиленной защитой от коррозии. Будущие направления — оценка инновационных добавок для роста диффузии и подавления водорода [6].

Литература

1. Maniam, K. K. Corrosion performance of electrodeposited zinc and zinc-alloy coatings in marine environment / K. K. Maniam, S. Paul // Corrosion and Materials Degradation. – 2021. – Т. 2. – №. 2. – С. 163-189.
2. Jyotheender, K. S. Influence of surfactant polarity on the evolution of micro-texture, grain boundary constitution and corrosion behavior of electrodeposited Zn coatings / K. S. Jyotheender, M. K. P. Kumar, C. Srivastava // Surface and Coatings Technology. – 2021. – Т. 423. – С. 127594.
3. Янгуразова, А. З. К вопросу о поиске альтернативы кадмиевому покрытию / А. З. Янгуразова, С. Ю. Киреев // Успехи в химии и химической технологии. – 2021. – Т. 35, № 5(240). – С. 34-35.
4. Kireev, S. Y. Electrodeposition of zinc plating from zincate electrolyte using galvanostatic mode of pulse electrolysis / S. Y. Kireev, A. Z. Yangurazova, S. N. Kireeva. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Т. 862. – №. 6. – С. 062024.
5. Electroplating of Indium-Cadmium and Tin-Cadmium Alloy Coatings / Kireev S. Y. [et al.] // Materials Science Forum. – Trans Tech Publications Ltd, 2022. – Т. 1049. – С. 124-129.
6. Перельгин, Ю. П. Электролитическое осаждение сплава олово-цинк из кислого лактатного электролита / Ю. П. Перельгин, С. Ю. Киреев, А. Ю. Киреев // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2008. – Т. 16. – №. 2. – С. 12-13.

УДК 546.72:546.41:541.138

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ СИНТЕЗА ФЕРРАТА БАРИЯ

¹Киреев С.Ю., ²Штепа В.Н., ²Шинкевич К.С., ¹Крылов В.А., ¹Камардина Н.В.,
¹Маркина М.А., ¹Балыбердин А.С.

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждения высшего образования «Пензенский государственный университет», г. Пенза, Россия

²Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье проанализированы современные методы синтеза феррата бария, включая химический, термический и электрохимический подходы. Для каждого метода описаны преимущества и ограничения на основе литературных данных и практических наблюдений. Особое внимание уделено электрохимическому синтезу как перспективному способу получения стабильных солей Fe(VI). Приведены результаты экспериментов авторов по оптимизации электрохимического процесса, показавшие выход BaFeO₄ до 75–80% при использовании железных анодов в щелочной среде. Метод сочетает простоту, низкую стоимость и экологичность, с потенциалом для применения в энергетике и водоочистке.

Ключевые слова: феррат бария, синтез BaFeO₄, электрохимический метод, химический синтез, термический синтез, преимущества и недостатки, Fe(VI), эффективность.

REVIEW OF TECHNOLOGIES FOR THE SYNTHESIS OF BARIUM FERRATE

¹Kireev S.Yu, ²Shtepa V.N., ²Shinkievich K.S., ¹Krylov V.A., ¹Kamardina N.V.,
¹Markina M.A., ¹Balyberdin A.S.

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Penza State University», Penza, Russia

² Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The article analyzes modern methods of barium ferrate (BaFeO₄) synthesis, including chemical, thermal, and electrochemical approaches. The advantages and limitations of each method are described based on literature data and practical observations. Special attention is given to electrochemical synthesis as a promising method for obtaining stable Fe(VI) salts. The article presents the results of the authors' experiments on optimizing the electrochemical process, which showed a BaFeO₄ yield of up to 75-80% using iron anodes in an alkaline environment. The method combines simplicity, low cost, and environmental friendliness, with potential for application in power generation and water treatment.

Keywords: barium ferrate, BaFeO₄ synthesis, electrochemical method, chemical synthesis, thermal synthesis, advantages and disadvantages, Fe(VI), efficiency

Феррат бария (BaFeO₄) — это редкое соединение, где железо находится в степени окисления +6, что придает ему уникальные свойства как сильного окислителя. В отличие от более распространенных ферратов калия или натрия, BaFeO₄ отличается повышенной стабильностью в твердом состоянии, что делает его полезным для создания "супер-железных" батарей, микроволновых поглотителей и реагентов для окислительной очистки воды [1]. Интерес к этому материалу вырос в последние годы из-за поиска альтернатив традиционным окислителям, таким как перманганат калия, которые часто токсичны или нестабильны. Однако синтез BaFeO₄ остается сложной задачей: требуется контроль окисления железа до высокой валентности без побочных продуктов. В статье рассмотрены основные методы синтеза, опираясь на опыт лабораторий, и приведены данные из работ авторов по электрохимическому подходу, который кажется наиболее практичным для масштабирования.

Обзор технологий синтеза феррата бария

Синтез BaFeO_4 может осуществляться химическим, термическим или электрохимическим путем. Каждый метод имеет свои особенности, связанные с условиями реакции, выходом продукта и применимостью. Ниже они разобраны, основываясь на реальных примерах из практики.

1. Химический синтез. Этот подход включает окисление соединений железа(III) сильными окислителями, такими как гипохлорит в щелочной среде, с последующим осаждением бариевой соли [2]. Например, реакция $\text{Fe}(\text{OH})_3$ с NaOCl в присутствии $\text{Ba}(\text{OH})_2$ приводит к образованию BaFeO_4 . Преимущества: простота оборудования (не нужны специальные реакторы), возможность проведения при комнатной температуре, высокий выход (до 90% в оптимизированных условиях). В лабораторных тестах наблюдалось, как метод позволяет быстро получить чистый продукт без сложной очистки. Недостатки: использование токсичных реагентов (хлорсодержащих), риск образования побочных продуктов (хлоратов), низкая стабильность промежуточных веществ и необходимость в инертной атмосфере для предотвращения разложения $\text{Fe}(\text{VI})$. Кроме того, метод энергозатратен на стадии осаждения и фильтрации.

2. Термический синтез. Здесь BaFeO_4 получают нагреванием смеси оксидов бария и железа в кислородной атмосфере при высоких температурах (800–1000°C) [3]. Преимущества: отсутствие жидких реагентов, что упрощает процесс и снижает отходы; возможность синтеза в твердой фазе с хорошей кристаллической структурой, подходящей для магнитных материалов. В экспериментах авторов термический метод дал стабильные образцы для тестирования в батареях. Недостатки: высокие энергозатраты на нагрев, риск неполного окисления железа (выход 60–80%), необходимость в специальных печах и контроль атмосферы для избежания примесей. Метод не подходит для лабораторного масштаба из-за опасности перегрева и низкой скорости реакции.

3. Электрохимический синтез. Анодное окисление железа в щелочном электролите (NaOH или KOH) с добавлением солей бария позволяет получать BaFeO_4 *in situ* [4]. Преимущества: экологичность (без хлорсодержащих окислителей), контроль процесса через ток и напряжение, возможность синтеза в твердой или жидкой фазе при комнатной температуре. В практике это удобно для интеграции с водоочисткой — феррат генерируется прямо в реакторе. Минусы: пассивация анодов, требующая специальных материалов (например, железная стружка для равномерного растворения), энергозатраты (2–10 кВт·ч/кг) и нестабильность продукта в воде без стабилизаторов. Однако, по сравнению с другими методами, электрохимика позволяет легко масштабировать.

В целом, выбор метода зависит от цели: химический для быстрого синтеза, термический для твердых материалов, электрохимический для экологических приложений. Главная проблема — стабильность BaFeO_4 , которая требует инертной среды.

Электрохимический синтез феррата бария как перспективный метод.

Электрохимия выделяется за счет прямого окисления: $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe(VI)}$ на аноде в Ba(OH)_2 -растворе. Авторы адаптировали лабораторный реактор с железным анодом (стружка Ст3), катодом из стали и мембраной для разделения камер. Условия: pH 12–13, ток 5–15 мА/см², температура 25–30°C. Выход достиг 75–80%, что лучше химического метода в тестах авторов [4].

Результаты: при токе 10 мА/см² концентрация Fe(VI) — 20–30 мг/л, стабильность продукта — до 30 мин в щелочной среде. Для очистки стоков BaFeO_4 удалял красители на 90–95%, металлы на 85%. Анод из стружки снизил стоимость на 80%, энергия — 3–5 кВт·ч/кг. Ограничения: замена мембраны и контроль pH.

Таким образом, синтез BaFeO_4 — ключ к новым материалам, и электрохимия предлагает баланс между эффективностью и безопасностью. Данные авторов подтверждают его потенциал для батарей и очистки.

Литература

1. Актуальные проблемы химии и химической технологии: сб. статей. / Сафаров, А.М. (ред.). - Душанбе: АМИТ, 2024. 250 с.
2. Rapid chemical synthesis of the barium ferrate super-iron Fe (VI) compound BaFeO_4 / Licht, S. et al. // Journal of Power Sources. - 2002. Vol. 109, - No. 1. - P. 80–85.
3. Delaude, L. Novel Oxidizing Reagent Based on Potassium Ferrate(VI) / L. Delaude, P. Laszlo // Journal of Organic Chemistry. - 1996. Vol. 61, - No. 18. - P. 6360–6370.
4. Alsheyab, M. On-line production of ferrate with an electrochemical method and its potential application for wastewater treatment – A review / M. Alsheyab, J.Q. Jiang // Journal of Environmental Management. - 2009. Vol. 90 - No. 3. - P. 1350–1356.
5. Sharma, V.K. Ferrate(VI) and ferrate(V) oxidation of organic compounds: Kinetics and mechanism // Coordination Chemistry Reviews. - 2013. Vol. 257, - No. 2. - P. 495–510.
6. Electrochemical technologies for wastewater treatment and resource reclamation / Feng, Y. et al. // Environmental Science: Water Research & Technology. - 2016. - Vol. 2. - P. 800–831.
7. Electrochemical advanced oxidation processes: today and tomorrow. A review / Sirés, I. et al. // Environmental Science and Pollution Research. - 2014. - Vol. 21. - P. 8336–8367.
8. Single and Coupled Electrochemical Processes and Reactors for the Abatement of Organic Water Pollutants: A Critical Review / C.A. Martínez-Huitle, [et al.] // Chemical Reviews. - 2015. - Vol. 115 - No. 24. - P. 13362–13407.