

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВРЕМЕНИ ОКИСЛЕНИЯ АЛЮМИНИЯ В СРЕДЕ СУБ- И СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ВОДЫ НА СОСТАВ И ТЕКСТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДЫХ ПРОДУКТОВ ОКИСЛЕНИЯ

И.И. Гильмутдинов — Казанский национальный исследовательский университет, Казань, Россия. ORCID 0000-0001-7627-5105. Эл. почта: ilnur1988@inbox.ru (*для переписки*)

А.Н. Сабирзянов — Казанский национальный исследовательский университет, Казань, Россия. ORCID 0000-0003-3310-6875. Эл. почта: SabirzyanovAN@corp.knitu.ru

©2025 г. Поступила в редакцию 27.03.2025 г. Прошла рецензирование 24.07.2025.
Принята к публикации 24.07.2025

Представлены результаты экспериментального исследования окисления алюминия суб- и сверхкритической водой в интервале 350—410 °С в течение 60—300 мин. Показано, что в результате окисления образуются гидроксиды и оксиды алюминия с развитой поверхностью. Выявлена немонотонная зависимость величины удельной поверхности продуктов окисления от температуры процесса, обусловленная образованием различных соединений и фаз оксида алюминия. Прокаливание продуктов окисления при 550 °С приводит к образованию γ -, χ - и α -фаз Al_2O_3 в соотношении, определяемом температурой и временем окисления в водном флюиде.

Ключевые слова: сверхкритическое водное окисление, оксид алюминия, структурные изменения.

ВВЕДЕНИЕ

Оксид алюминия в различных модификациях имеет широкое применение в различных отраслях промышленности. Например, в нефтегазовой промышленности наночастицы оксида алюминия применяют в качестве агента для повышения нефтеотдачи, который может изменять смачиваемость горных пород, снижать вязкость нефти, а также поверхностное натяжение между нефтью и водой [1]. Наночастицы Al_2O_3 препятствуют мобилизации каолинита во время добычи углеводородов, улучшают реологические свойства буровых растворов [2]. Они также являются катализатором при очистке сырой нефти, удаляют асфальтены из сырой нефти и используются для обнаружения границы раздела вода—нефть [3]. В работах [4, 5] предлагается использование оксида алюминия как высокоэффективного адсорбента органических красителей. Благодаря высоким механическим свойствам развитой поверхности и устойчивости к деградации в условиях окружающей среды, оксид алюминия рассматривается как перспективный сорбент для решения экологических проблем. Опубликованы работы по применению монокристаллического сапфира или поликристаллического оксида алюминия высокой плотности для изготовления биологических имплантатов высокого качества [6—9]. Однако

наиболее широкое применение оксид алюминия находит в качестве носителя катализаторов [10–14].

Также огромное разнообразие имеют и методы получения оксида и гидроксида алюминия (золь–гель, осаждение, микроэмульсия и гидротермальные методы) [15]. Одной из перспективных и экологически чистых сред для проведения химических реакций, в частности для получения оксидов металлов, является вода в суб- и сверхкритическом флюидном состоянии. Применение воды в сверхкритическом флюидном состоянии вызывает большой интерес для решения многих задач промышленности [16].

В настоящее время уникальные свойства, возможности и области применения сверхкритической воды достаточно хорошо изучены и представлены в работах [17–23]. Вода в сверхкритическом флюидном состоянии является активной реакционной средой, реагентом и одновременно катализатором, так как процессы в ней протекают через промежуточное образование гидратированных форм оксидов, которые превращаются в конечный продукт путем отщепления воды [24, 25]. В работе [26] исследовано влияние температуры на кинетику образования водорода при окислении образцов алюминия размером до 3 мм сверхкритической водой. По результатам рентгеноструктурного анализа установлено, что при 327 °С образуется AlOOH со средним размером частиц 120 мкм. Однако текстурные характеристики образцов не определялись. Целью работ [27, 28] было формирование кристаллов корунда; процесс вели в сверхкритическом водном флюиде при 400 °С, начальном давлении 26,4 МПа и последующей продолжительной выдержкой в среде синтеза. В работе [27] установлено, что добавка частиц $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в среду синтеза приводит к ускорению образования частиц корунда из-за увеличения скорости зародышеобразования. Так показано, что с увеличением времени обработки в среде сверхкритической воды средний размер кристаллов уменьшается.

Цель настоящей работы — определение зависимостей влияния температуры и времени окисления металлического алюминия в среде суб- и сверхкритической воды на состав твердых продуктов окисления, определение текстурных характеристик и средний размер частиц.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектами исследования суб- и сверхкритического водного окисления служили образцы алюминия цилиндрической формы длиной 50 мм и диаметром 3 мм. В качестве среды окисления использована деионизированная вода.

Схема экспериментальной установки для проведения процессов суб- и сверхкритического водного окисления представлена на рис. 1. Основным узлом установки является реактор (1) объемом 1000 мл, выполненный из материала hastelloy-276. Жидкость в ходе эксперимента подается в реактор насосом (2). Нагрев реактора осуществляют при помощи электрического нагревателя (3) мощностью 3,5 кВт. Внутри реактора расположен змеевик для принудительного охлаждения. Управление процессом осуществляют через блок управления (4). Температуру внутри реактора измеряют термопарой (6), давление — манометром (7). Максимальное рабочее давление не должно превышать 40 МПа; во избежание аварийного выключения установки предусмотрен клапан сброса избыточного давления (10), который срабатывает при повышении давления в реакторе до 38 МПа.

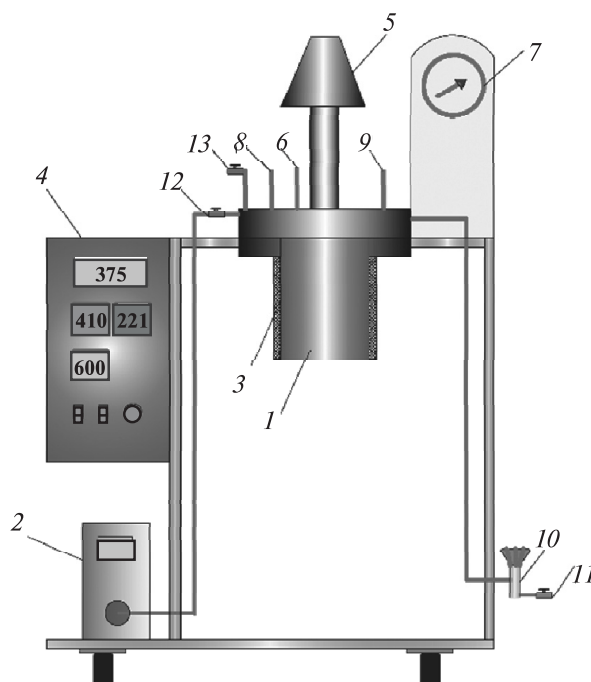


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования процессов суб- и сверхкритического водного окисления:

1 — реактор; 2 — насос; 3 — электрический нагреватель; 4 — блок управления; 5 — магнитная мешалка; 6 — термopара; 7 — манометр; 8, 9 — штуцеры подачи воды в систему охлаждения (змеевик, расположен внутри реактора); 10 — клапан сброса избыточного давления; 11, 12 — вентили; 13 — штуцер с вентилем для отбора газообразных продуктов

Перед началом эксперимента в реактор (1) загружали образцы алюминия массой 30 г и заливали 326 мл деионизированной воды. После этого реактор герметизировали и включали нагрев. Время нагрева реактора до 350 °С — 50 мин, до 410 °С — 60 мин. Отсчет времени окисления начинается с момента достижения заданной температуры. В результате окисления алюминия выделяется водород, вследствие чего возрастает давление в реакторе. В эксперименте фиксировали максимальное значение давления P_{\max} . При достижении заданного времени окисления нагрев отключали, реактор принудительно охлаждали до комнатной температуры, разгерметизировали и из него извлекали продукты окисления, которые просушивали при 80 °С и атмосферном давлении. Основные условия проведения экспериментов представлены в табл. 1.

Фазовый состав продуктов суб- и сверхкритического водного окисления алюминия определяли при помощи рентгеновского дифрактометра Rigaku SmartLab, Япония. Величины удельной поверхности (по методу БЭТ), удельного объема пор и среднего диаметра пор продуктов окисления определяли на анализаторе TOP 200 фирмы Altamira Instruments, Италия. Средние размеры частиц и их распределение по размерам определяли при помощи анализатора размера частиц Horiba LA-960A2 (Франция) до и после обработки образцов ультразвуком (частота 40 кГц, мощность 30 Вт) в дистиллированной воде. Морфологию образцов исследовали с использованием сканирующего электронного микроскопа Auriga CrossBeam, Германия.

Таблица 1

Параметры суб- и сверхкритического водного окисления алюминия

№	Температура, °С	Максимальное давление, МПа	Время, мин
1	350	16,2	240
2	360	19,4	240
3	375	24,5	240
4	390	26,8	240
5	410	35,8	240
6	375	22,8	60
7	375	24,4	120
8	375	24,5	180
9	375	24,8	300

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Суб- и сверхкритическое водное окисление алюминия согласно [21] включает следующие стадии:

1) при 200 °С происходит разрушение оксидной пленки и реакция алюминия с водой с образованием бёмита:



2) выше 300 °С начинается терморазложение бёмита до оксида алюминия по реакции:



При дальнейшей выдержке под воздействием температуры в суб- и сверхкритической водной среде происходят структурные изменения форм оксида алюминия.

Результаты определения удельной поверхности, размера пор и среднего размера частиц продуктов окисления алюминия в среде суб- и сверхкритической воды представлены в табл. 2. Результаты показывают, что повышение температуры процесса суб- и сверхкритического водного окисления приводит к уменьшению среднего размера частиц. Также показано, что повышение температуры окисления с 350 до 390 °С способствует увеличению удельной поверхности образцов от 10,3 до 29,6 м²/г. Дальнейший рост температуры до 410 °С приводит к снижению этой величины до 20,2 м²/г. Это можно объяснить тем, что с ростом температуры увеличивается содержание в образце корунда (α -Al₂O₃), который является самой стабильной фазой оксида алюминия и имеет меньшую удельную поверхность. У образцов, полученных при 375 °С, с увеличением времени пребывания в сверхкритической водной среде с 60 до 300 мин удельная поверхность уменьшается с 24,2 до 11,7 м²/г, возможно, за счет укрупнения частиц в ходе обработки. Как видно из табл. 2, при ультразвуковой обработке образца средний размер его частиц существенно

Таблица 2

**Результаты исследования удельной поверхности, размера пор
и среднего размера частиц оксидов алюминия (или твердых продуктов окисления)**

№	$S_{БЭТ}$, м ² /г	Объем пор, см ³ /г	Размер пор, нм	Средний размер частиц, мкм	
				без ультразвуковой обработки	после ультразвуковой обработки
1	10,3	0,086	33,6	429	105
2	10,3	0,071	27,7	422	145
3	12,0	0,068	18,0	150	25
4	29,6	0,129	17,4	25	12
5	20,2	0,108	21,3	19	10
6	24,2	0,081	13,3	82	28
7	15,6	0,058	14,9	114	20
8	12,1	0,056	18,3	126	18
9	11,7	0,061	21,1	174	22

снижается, что указывает на образование в ходе суб- и сверхкритического водного окисления агломератов оксида алюминия, которые разрушаются при воздействии ультразвука. Результаты эксперимента при 375 °С показывают, что с увеличением времени обработки происходит увеличение среднего размера агломератов.

Образование агломератов подтверждается данными сканирующей электронной микроскопии. На рис. 2 представлена микрофотография

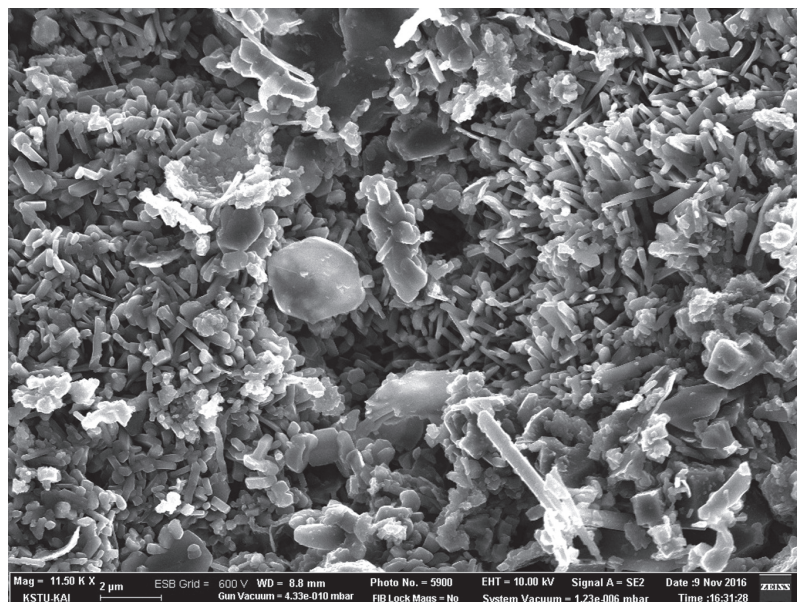


Рис. 2. Микрофотография образца № 4, полученная на сканирующем электронном микроскопе

Влияние температуры и времени окисления алюминия в среде суб- и сверхкритической воды на состав и текстурные характеристики твердых продуктов окисления

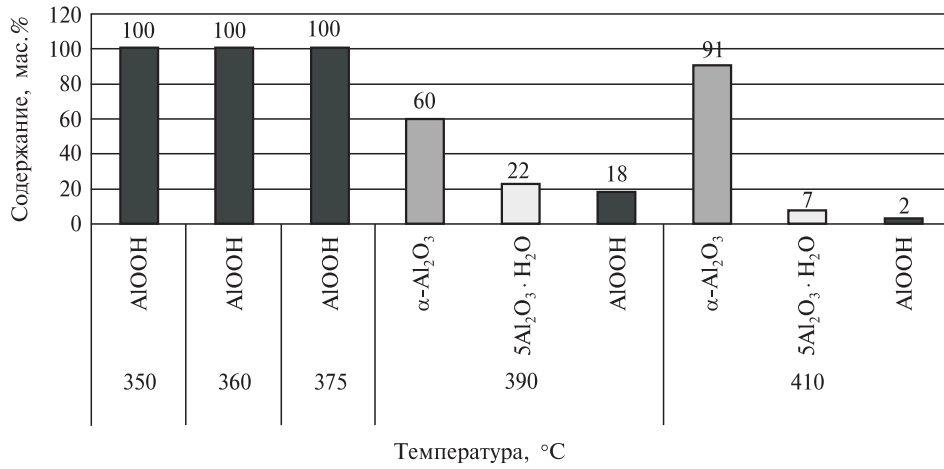


Рис. 3. Дифрактограммы образцов после сушки при 80 °С и атмосферном давлении

образца № 4 — оксида алюминия, полученного при 390 °С и представляющего собой агломераты, состоящие из частиц в форме стержня и частиц неправильной формы. На фотографии также видно, что мелкие частицы агломерированы в более крупные.

Результаты рентгенофазового анализа образцов после просушивания продуктов окисления при 80 °С, а также после прокаливания в муфельной печи при 550 °С в течение 120 мин представлены на рис. 3 и рис. 4. Образцы, полученные при температурах до 375 °С включительно, содержат 100 % бёмита. Дальнейшее повышение температуры приводит к снижению содержания фазы бёмита, образованию фазы акдалаита и росту содержания фазы α-Al₂O₃.

Результаты рентгенофазового анализа образцов после прокаливания показывают их значительные структурные изменения. Образцы, полученные при 350 и 360 °С, полностью переходят в γ-Al₂O₃. При 375 °С образуется γ-Al₂O₃, который частично переходит в α-Al₂O₃. Увеличение температуры до 410 °С приводит к превращению γ-Al₂O₃ в α-Al₂O₃, а также к образованию незначительного количества промежуточной фазы χ-Al₂O₃.

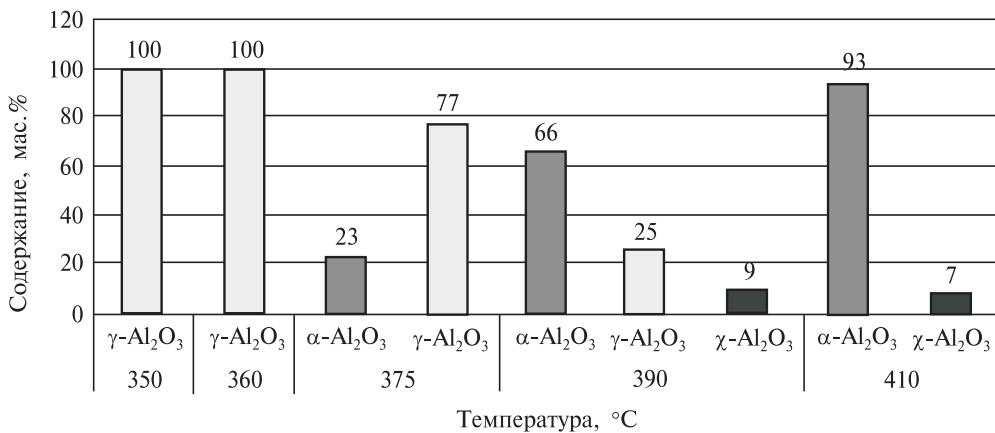


Рис. 4. Дифрактограммы образцов после прокаливания на воздухе при 550 °С в течение 120 мин

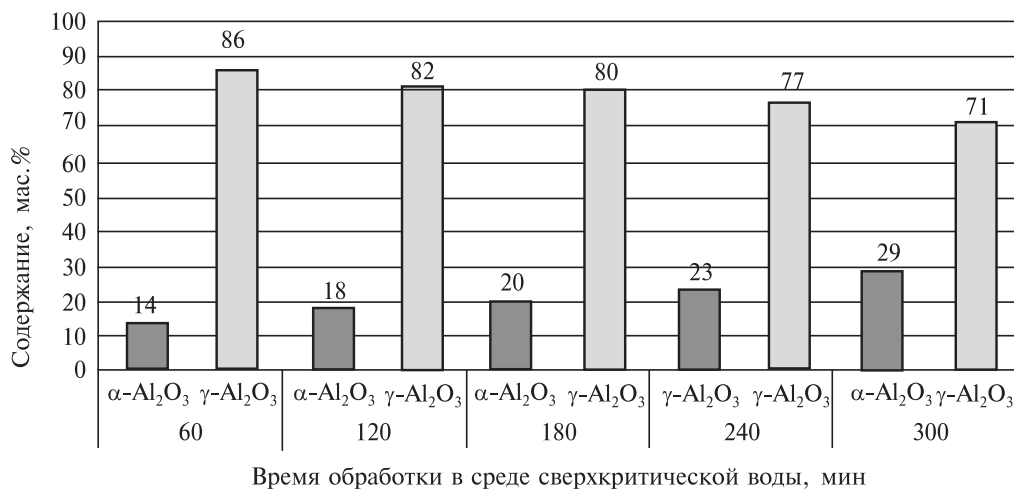


Рис. 5. Дифрактограммы образцов № 3, 6–9 после прокаливания на воздухе при 550 °С

Результаты рентгенофазового анализа образцов, полученных при 375 °С и варьировании времени обработки в среде сверхкритической воды в диапазоне 60–300 мин, представлены на рис. 5. Они показывают, что после просушивания во всех образцах присутствует только фаза AlOOH . После прокаливании в муфельной печи при 550 °С она переходит в γ - Al_2O_3 и α - Al_2O_3 . С увеличением времени обработки в водном флюиде с 60 до 300 мин доля γ - Al_2O_3 в продуктах снижается от 86 до 71 %; соответственно, содержание фазы α - Al_2O_3 растет с 14 до 29 %. Таким образом, при окислении алюминия сверхкритической водой образуется AlOOH , который при термической обработке при 550 °С переходит в γ - Al_2O_3 и α - Al_2O_3 . Содержание корунда в продукте термообработки возрастает при увеличении времени окисления сверхкритической водой. Аналогичные результаты получены в работе [28].

ВЫВОДЫ

1. В среде суб- и сверхкритической воды при 350–410 °С алюминий окисляется до бёмита (AlOOH), акадалита ($5\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) и корунда (α - Al_2O_3).
2. При последующем прокаливании образцов в муфельной печи при 550 °С в течение 120 мин происходят структурные изменения с образованием γ - Al_2O_3 , χ - Al_2O_3 и α - Al_2O_3 .
3. При повышении температуры сверхкритического водного окисления с 375 до 390 °С увеличивается удельная площадь поверхности образцов. Дальнейшее увеличение температуры приводит к снижению удельной площади поверхности, что можно объяснить увеличением содержания в образце фазы α - Al_2O_3 , которая имеет меньшую удельную площадь поверхности.
4. С увеличением времени обработки в сверхкритической водной среде при 375 °С в диапазоне 60–300 мин возрастает доля фазы α - Al_2O_3 и уменьшается доля γ - Al_2O_3 , чем объясняется снижение величины удельной площади поверхности продукта окисления алюминия.
5. Продукты окисления представлены частицами микронных размеров, образующих агломераты, способные к разрушению при воздействии ультразвуком.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан», Соглашение № 112/2024-ПД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Henraningrat L., Torsaeter O. // *Appl. Nanosci.* 2015. Vol. 5. P. 181.
2. Hullio I.A., Tunio A.H., Akhtar W., Memon M.A., Gabol N.M. // *ACS Omega.* 2024. Vol. 10. No 1. P. 955.
3. Ogolo N., Onyekonwu M.O. // *J. Oil, Gas and Petrochemical Technology.* 2022. Vol. 9. No 1. P. 8.
4. Rajendran S., Palani G., Shanmugam V., Trilaksanna H., Kannan K., Nykiel M., Korniejenko K., Marimuthu U. // *Adsorption. Molecules.* 2023. Vol. 28. No 23. P. 7922.
5. Hani Hawraa, Ruba Abbas, Emad Eltayef, Neda Ibrahim // *Samarra J. Pure and Applied Science.* 2020. Vol. 2. P. 19.
6. Rahmati M., Mozafari M. // *J. Cellular Physiology.* 2018. Vol. 234. Vol. 4. P. 3321.
7. Dental, tissue scaffold, and other specialized biomedical applications of alumina / In: *Alumina Ceramics. Biomedical and Clinical Applications.* Ruys A. 2019.
8. Zahra A.L., Tammemi Z. // *Nanomedicine.* 2021. Vol. 4. P. 1.
9. Peyman H., Panahi Y., Ebrahimi-Kalan A., Akbarzadeh A., Davaran S., Nasibova A., Khalilov R., Kavetskyu T. // *Micro & Nano Letters.* 2018. Vol. 13. No 9. P. 1227.
10. Monica T., Stefano T. // *European J. Inorganic Chemistry.* 2005. Vol. 17. P. 3393.
11. Иванова А.С. // *Кинетика и катализ.* 2012. Т. 53. № 4. С. 446.
12. Исупова Л.А., Коваленко О.Н., Андреева А.В., Ведерников О.С., Ламберов А.А., Пимерзин А.А., Резниченко И.Д., Тыщенко В.А., Клейменов А.В., Пармон В.Н. // *Катализ в промышленности.* 2021. Т. 21. № 6. С. 368.
13. Mokaizh A.A.B., Alazaiza M.Y.D., Ramu M.B., Nassani D.E. // *Catalysts.* 2025. Vol. 15. No 3. P. 215.
14. Wang C.H. // *Chemosphere.* 2004. Vol. 55. No 1. P. 11.
15. Ravichandran S., Durai R.D., Krishnan P.D., Rameshkumar P., Thomas T., Narayanan S.N., Hosnedlova B., Havelkova B., Jakubek M., Beklova M., Kizek R., Narayanan V.H. // *NANOCON 2021 Conference Proceedings.* P. 337.
16. Горбатый Ю.Е., Бондаренко Г.В. // *Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика.* 2007. Т. 2. № 2. С. 5.
17. Синёв М. Ю. // *Журнал физической химии.* 2021. Т. 95. № 3. С. 312.
18. Синёв М.Ю., Шаповалова О.В. // *Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика.* 2020. Т. 15. № 3. С. 87.
19. Востриков А.А., Федеяева О.Н., Федеяева И.И., Сокол М.Я. // *Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика.* 2010. Т. 5. № 1. С. 12.
20. Jiang Z., Li Y., Wang S., Cui C., Yang C., Li J. // *Applied Sciences.* 2020. V. 10. No 14. P. 4937.
21. Taj M. // *J. Biodiversity and Environmental Sciences.* 2019. Vol. 14. P. 53.
22. Trowell K.A., Goroshin S., Frost D.L., Bergthorson J.M. // *Sustainable Energy & Fuels.* 2020. Vol. 4. P. 5628.
23. Gilmutdinov I.I., Sandugei N.S., Gilmutdinov I.M., Kuznetcova I.V., Kharlampidi Kh.E., Sabirzy-nov A.N. // *High Temperature.* 2022. Vol. 60. P. 177.
24. Danchevskaya M.N., Ivakin Yu.D., Torbin S.N., Muravieva G.P. // *J. Supercrit. Fluids.* 2008. Vol. 46. No 3. P. 358.
25. Лагунова Е.А., Ивакин М.Ю., Синёв М.Ю., Шашкин Д.П., Гордиенко Ю.А., Фаттахова З.Т. // *Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика.* 2020. Т. 15. № 2. С. 14.

26. Trowell K.A., Goroshin S., Frost D.L., Bergthorson J.M. // Sustainable Energy & Fuels. 2020. Vol. 4. P. 5628.
27. Ивакин Ю.Д., Данчевская М.Н., Муравьева Г.П. // Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика. 2014. Т. 9. № 3. С. 36.
28. Ивакин Ю.Д., Данчевская М.Н. // Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика. 2018. Т. 13. № 1. С. 4.

EFFECT OF TEMPERATURE AND TIME OF ALUMINUM OXIDATION IN SUB- AND SUPERCRITICAL WATER ON COMPOSITION AND TEXTURAL CHARACTERISTICS OF SOLID OXODATION PRODUCTS

I.I. Gilmutdinov — Kazan National Research University, Kazan, Russia. ORCID 0000-0001-7627-5105. E-mail: ilnur1988@inbox.ru (*for correspondence*)

A.N. Sabirzyanov — Kazan National Research University, Kazan, Russia. ORCID 0000-0003-3310-6875. E-mail: SabirzyanovAN@corp.knitu.ru

The results of an experimental study of aluminum oxidation with sub- and supercritical water in the range of 350–410 °C for 60–300 min are presented. It is shown that aluminum hydroxides and oxides with a developed surface are formed as a result of oxidation. A non-monotonic dependence of the specific surface area of the oxidation products on the process temperature is revealed, caused by the formation of various compounds and phases of aluminum oxide. Calcination of the oxidation products at 550 °C leads to the formation of γ -, χ - and α -phases of Al_2O_3 in a ratio determined by the temperature and time of oxidation in a water fluid.

Key words: supercritical water oxidation, aluminum oxide, structural changes.

ACKNOWLEDGMENT

The work was carried out at the expense of a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, provided to young candidates of science (postdoctoral fellows) for the purpose of defending a doctoral dissertation, carrying out research work, and also performing work functions in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan within the framework of the State Program of the Republic of Tatarstan «Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan», Agreement No 112/2024-PD.

REFERENCES

1. Henraningrat L., Torsaeter O. // Appl. Nanosci. 2015. Vol. 5. P. 181.
2. Hullio I.A., Tunio A.H., Akhtar W., Memon M.A., Gabol N.M. // ACS Omega. 2024. Vol. 10. No 1. P. 955.
3. Ogolo N., Onyekonwu M.O. // J. Oil, Gas and Petrochemical Technology. 2022. Vol. 9. No 1. P. 8.
4. Rajendran S., Palani G., Shanmugam V., Trilaksanna H., Kannan K., Nykiel M., Korniejenko K., Marimuthu U. // Adsorption. Molecules. 2023. Vol. 28. No 23. P. 7922.
5. Hami Hawraa, Ruba Abbas, Emad Eltayef, Neda Ibrahim // Samarra J. Pure and Applied Science. 2020. Vol. 2. P. 19.

6. *Rahmati M., Mozafari M.* // J. Cellular Physiology. 2018. Vol. 234. Vol. 4. P. 3321.
 7. Dental, tissue scaffold, and other specialized biomedical applications of alumina / In: Alumina Ceramics. Biomedical and Clinical Applications. Ruys A. 2019.
 8. *Zahra A.L., Tammemi Z.* // Nanomedicine. 2021. Vol. 4. P. 1.
 9. *Peyman H., Panahi Y., Ebrahimi-Kalan A., Akbarzadeh A., Davaran S., Nasibova A., Khalilov R., Kavetsky T.* // Micro & Nano Letters. 2018. Vol. 13. No 9. P. 1227.
 10. *Monica T., Stefano T.* // European J. Inorganic Chemistry. 2005. Vol. 17. P. 3393.
 11. *Ivanova A.S.* // Kinetics and Catalysis. 2012. Vol. 53. No 4. P. 425.
 12. *Isupova L., Kovalenko O., Andreeva A., Vedernikov O., Lamberov A., Pimerzin A., Reznichenko I., Tyshchenko V., Kleymenov A., Parmon V.* // Kataliz v promyshlennosti. 2021. V. 21. No. 6. P. 368.
 13. *Mokaizh A.A.B., Alazaiza M.Y.D., Ramu M.B., Nassani D.E.* // Catalysts. 2025. Vol. 15. No 3. P. 215.
 14. *Wang C.H.* // Chemosphere. 2004. Vol. 55. No 1. P. 11.
 15. *Ravichandran S., Durai R.D., Krishnan P.D., Rameshkumar P., Thomas T., Narayanan S.N., Hosnedlova B., Havelkova B., Jakubek M., Beklova M., Kizek R., Narayanan V.H.* // NANOCON 2021 Conference Proceedings. P. 337.
 16. *Gorbaty Yu.E., Bondarenko G.V.* // Supercritical Fluids: Theory and Practice 2007. Vol. 2. No 2. P. 5 (in Russ.)
 17. *Sinev M.Y.* // Russ. J. Phys. Chem. A. 2021. Vol. 95. No 3. P. 312.
 18. *Sinev M.Y., Shapovalova O.V.* // Russ. J. Phys. Chem. B. 2021. Vol. 15. P. 114. DOI: 10.1134/S1990793121070137
 19. *Vostrikov A.A., Fedyaeva O.N., Fadeeva I.I., Sokol M.Ya.* // Supercritical Fluids: Theory and Practice. 2010. Vol. 5. No 1. P. 12 (in Russ.).
 20. *Jiang Z., Li Y., Wang S., Cui C., Yang C., Li J.* // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. No 14. P. 4937.
 21. *Taj M.* // J. Biodiversity and Environmental Sciences. 2019. Vol. 14. P. 53.
 22. *Trowell K.A., Goroshin S., Frost D.L., Bergthorson J.M.* // Sustainable Energy & Fuels. 2020. Vol. 4. P. 5628.
 23. *Gilmutdinov I.I., Sandugei N.S., Gilmutdinov I.M., Kuznetcova I.V., Kharlampidi Kh.E., Sabirzynov A.N.* // High Temperature. 2022. Vol. 60. P. 177.
 24. *Danchevskaya M.N., Ivakin Yu.D., Torbin S.N., Muravieva G.P.* // J. Supercrit. Fluids. 2008. Vol. 46. No 3. P. 358.
 25. *Lagunova E.A., Ivakin Y.D., Sinev M.Y., Shashkin D.P., Gordienko Yu.A., Fattakhova Z.T.* // Russ. J. Phys. Chem. B. 2020. Vol. 14. P. 1252. DOI: 10.1134/S1990793120080047
 26. *Trowell K.A., Goroshin S., Frost D.L., Bergthorson J.M.* // Sustainable Energy & Fuels. 2020. Vol. 4. P. 5628.
 27. *Ivakin Y.D., Danchevskaya M.N., Muravieva G.P.* // Russ. J. Phys. Chem. B. 2015. Vol. 9, P. 1082. DOI: 10.1134/S1990793115070088
 28. *Ivakin Yu.D., Danchevskaya M.N.* // Russ. J. Phys. Chem. B. 2018. Vol. 12. P. 1205. DOI:10.1134/S1990793118080055
-
-