

**Материаловедение
и технологии материалов
Materials science and materials technology**

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 546.831
doi: 10.30987/2782-5957-2025-5-69-79

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУЧАЕМОГО ПРОДУКТА: АНАЛИЗ
СВОЙСТВ ОКСИДА ЦИРКОНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО РАЗЛИЧНЫМИ
МЕТОДАМИ**

Алексей Алексеевич Дорохов✉

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Россия
m1606605@edu.misis.ru

Аннотация

Цель данного исследования заключается в систематизации существующих данных о характеристиках оксида циркония (ZrO_2), полученного различными методами синтеза, с акцентом на сравнительный анализ его свойств и влияние методов на практическое применение.

Задача статьи — рассмотреть основные этапы синтеза и оценить физико-химические свойства оксида циркония, включая механическую прочность, термическую стабильность и морфологические характеристики.

Методы исследования включают систематический обзор литературы с использованием баз данных, таких как Scopus и Web of Science, а также анализ экспериментальных данных.

Новизна работы заключается в выявлении взаимосвязи между методами синтеза и характеристиками полученного материала, что открывает

новые возможности для его применения в различных отраслях, включая медицину и материаловедение.

Результаты исследования показывают, что гидротермальный и солевой методы обеспечивают оптимальные параметры для создания высококачественных изделий.

Выводы подчеркивают необходимость дальнейшего изучения свойств оксида циркония и разработки экологически чистых методов его получения, что может значительно расширить сферы его практического применения. Рекомендуется междисциплинарное взаимодействие специалистов для создания инновационных технологий на основе оксида циркония.

Ключевые слова: оксид циркония, методы, синтез, характеристики, материалы, стабильность, свойства, микроструктура.

Ссылка для цитирования:

Дорохов А.А. Характеристики получаемого продукта: анализ свойств оксида циркония, полученного различными методами / А.А. Дорохов // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 5. – С. 69-79. doi: 10.30987/2782-5957-2025-5-69-79.

Original article
Open Access Article

**CHARACTERISTICS OF THE RESULTING PRODUCT: PROPERTIES
ANALYSIS OF ZIRCONIUM OXIDE OBTAINED BY VARIOUS METHODS**

Aleksey Alekseevich Dorokhov✉

NUST MISIS, Moscow, Russia
m1606605@edu.misis.ru

Abstract

The study objective is to systematize the existing data on the characteristics of zirconium oxide (ZrO_2) obtained by various synthesis methods, with an

emphasis on a comparative analysis of its properties and the impact of the methods on practical application.

The paper task is to review the main stages of synthesis and evaluate the physical-chemical properties of zirconium oxide, including mechanical strength, thermal stability and morphological characteristics.

The research methods include a systematic review of the literature using databases such as Scopus and the Web of Science, as well as the analysis of experimental data.

The novelty of the work is in identifying the correlation between synthesis methods and the characteristics of the resulting material, which opens up new opportunities for its application in various industries, including medicine and materials science.

Reference for citing:

Dorokhov AA. Characteristics of the resulting product: properties analysis of zirconium oxide obtained by various methods. Transport Engineering. 2025;5:69-79. doi: 10.30987/2782-5957-2025-5-69-79.

Введение

Формулировка исследовательской проблемы

В последние десятилетия оксид циркония (ZrO_2) привлекает значительное внимание исследователей благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам и широкому спектру применения в различных отраслях, включая медицину, электронику и материаловедение. Однако, несмотря на его популярность, существует множество методов синтеза, каждый из

The results of the study show that hydrothermal and salt methods provide optimal parameters for creating high-quality products.

The conclusions emphasize the need to further study the properties of zirconium oxide and develop environmentally friendly methods for its production, which can significantly expand the scope of its practical application. Interdisciplinary collaboration of specialists is recommended to create innovative technologies based on zirconium oxide.

Keywords: zirconium oxide, methods, synthesis, characteristics, materials, stability, properties, microstructure.

Обоснование актуальности

Актуальность темы исследования обусловлена растущими требованиями к качеству и функциональности материалов в современных технологиях. Оксид циркония, благодаря своей высокой прочности, термостойкости и коррозионной стойкости, становится критически важным в таких областях, как производство медицинских имплантатов, огнеупорных материалов и катализаторов. В условиях глобального роста антибиотикорезистент-

которых влияет на морфологические характеристики, кристаллическую структуру и механические свойства получаемого материала. Это создает необходимость в систематизации существующих исследований и сравнительном анализе различных методов получения оксида циркония, чтобы определить оптимальные условия для достижения желаемых свойств.

ности и необходимости разработки новых антимикробных средств, исследование антимикробной активности наночастиц ZrO_2 открывает новые горизонты для его применения в здравоохранении. Поэтому систематизация существующих данных о методах синтеза и их влиянии на свойства оксида циркония имеет важное значение для дальнейших исследований и разработки инновационных материалов.

Обзор опорной информации

Изучение оксида циркония началось с его открытия в конце XVIII века, и с тех пор исследователи разработали множество методов его получения, включая гидролиз солей, золь-гель метод и гидро-термальный синтез. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, которые влияют на конечные характеристики материала. Например, золь-гель технология позволяет получить ок-

сид с высокой чистотой и развитой поверхностью, в то время как гидролиз может привести к загрязнению конечного продукта. Важно отметить, что морфологические характеристики и структура кристаллической решетки ZrO_2 могут существенно изменяться в зависимости от условий синтеза, что в свою очередь влияет на его механические и термические свойства. Таким образом, систематиче-

ский обзор существующих исследований позволит глубже понять взаимосвязь между методами синтеза и свойствами

Материалы и методы

В данной статье представлен систематический обзор литературы, в ходе которого были проанализированы исследования, посвященные оксиду циркония, полученному различными методами.

Основные этапы работы включают:

1. Поиск литературы. Для сбора информации использовались такие базы данных, как *Elibrary*, *Scopus*, *Web of Science* и Киберленинка. В качестве ключевых слов были выбраны «оксид циркония», «методы синтеза», «физико-химические свойства», «керамические материалы», «термическая стабильность», «механические свойства», «синтез», «микроструктура».

Результаты и обсуждения

В конце XVIII века было совершено научное открытие оксида циркония (ZrO_2) [1]. В 1789 году немецкий химик Мартин Генрих Клапрот синтезировал оксид циркония, выделив его из минерала циркона. Это стало значительным достижением в изучении циркония и его соединений [2]. В 1824 году шведский химик Йенс Якоб Берцелиус выделил цирконий уже в свободном виде [3].

В 1892 году в ходе минералогической экспедиции, организованной на территории Шри-Ланки и Бразилии, был обнаружен природный бадделеит, который стал важным дополнением к информации о цирконии [4]. До 2002 года Южная Африка являлась основным производителем бадделеита, но с тех пор предприятия были закрыты, и единственным коммерческим источником этого минерала стал Кольский полуостров Российской Федерации [5].

В дальнейшем разработка технологии стабилизации диоксида циркония позволила создать осветительные элементы, которые получили широкое распространение в начале XIX века [6].

Цирконий – это металл, который в природе встречается в виде двух основных минералов: циркона ($ZrSiO_4$) и бадделеита

оксида циркония, что станет основой для дальнейших инновационных разработок в этой области.

2. Отбор статей. Были отобраны статьи, опубликованные преимущественно в течение последних 10 лет, в которых описываются различные методы синтеза оксида циркония и исследуются его свойства [1-36]. Особое внимание уделялось экспериментальным данным, касающимся морфологии, кристаллической структуры и механических свойств.

3. Анализ данных. Были изучены полученные результаты, включая сравнение свойств оксида циркония, полученного различными методами. Оценивались такие параметры, как размер частиц, степень кристалличности, термическая стабильность и механическая прочность.

(ZrO_2). Циркон является наиболее распространенным источником оксида циркония, в то время как бадделеит встречается реже. Циркон широко распространен в почвах в качестве компонента магматических, метаморфических и осадочных пород. Также он может встречаться в тяжелых остатках горных пород или пляжного песка, представляющего собой смесь тяжелых минералов [7].

Благодаря уникальным физико-химическим свойствам оксид циркония является одним из наиболее востребованных материалов в передовых технологических разработках. Он обладает высокой прочностью, устойчивостью к температурным воздействиям, коррозионной стойкостью и совместимостью с биологическими тканями. ZrO_2 находит широкое применение в различных областях, включая применение в производстве керамики (эмаль, глазурь, пигменты), огнеупорных материалов, литейных форм, пьезоэлектрических кристаллов, катализаторов для органических реакций и даже в медицине (эндопротезы, зубные протезы, ортопедические имплантаты) [8-20]. Тугоплавкая керамика на основе диоксида циркония начала широко применяться в промышленности в 20-х го-

дах XX века [17]. В настоящее время циркониевые соединения активно используются в современном материаловедении при производстве монокристаллических структур, керамических изделий различного назначения, защитных покрытий, волоконных материалов, нанодисперсных порошков и композитов.

Одним из новых перспективных направлений использования оксида циркония является его применение в борьбе с антибиотикорезистентностью. В последние десятилетия расходы на эту проблему значительно увеличились, что требует поиска инновационных решений. Исследование, проведенное *Nazish Tabassum* и соавторами, показало, что синтезированные наночастицы оксида циркония (ZrO_2) обладают антимикробной активностью против грамположительных (*Staphylococcus aureus*) и грамотрицательных (*Klebsiella pneumoniae*) бактерий, сравнимой с традиционными антибиотиками. Кроме того, наночастицы ZrO_2 продемонстрировали антиоксидантные и противоопухолевые свойства, что открывает новые возможности для их применения в системах здравоохранения для борьбы с инфекционными заболеваниями [21].

Благодаря своей высокой коррозионной стойкости, оксид циркония используется в качестве конструкционного материала в атомной энергетике и в качестве покрытия для топливных стержней ядерных реакторов из-за низкого поперечного сечения для нейтронов. Кроме того, цирконий может быть применен для синтеза неорганических ионообменников, таких как фосфат циркония и кремневольфрамат циркония, которые используются для сорбции урана из растворов ядерных отходов. Широкий спектр применения ZrO_2 стимулирует исследователей к поиску различных химических методов его получения из природных источников [22].

Морфологические характеристики, структура кристаллической решетки и функциональные свойства получаемого материала зависят от выбранного метода синтеза, среди которых выделяют солевой (гидролиз солей циркония), гидротермаль-

ный, соляной, золь-гель метод и механохимические методы.

Исследование оксида циркония приобретает особую актуальность в связи с широким спектром его применения в различных отраслях. Комплексное изучение свойств соединения открывает новые перспективы для создания передовых материалов с уникальными физико-химическими характеристиками. Разработка экологически чистых методов получения оксида циркония и всесторонняя оценка его свойств способствуют развитию научных исследований и стимулируют развитие высокотехнологичных производств.

Циркон – минерал, относящийся к классу ортосиликатов. Его химическая формула – $ZrSiO_4$, и он кристаллизуется в пространственной группе *I41/amd*. Структура циркона состоит из цепочек последовательных многогранников SiO_4 и ZrO_2 , которые соединены общими гранями и проходят вдоль оси *c*. Эта структура достаточно обширна и включает «каналы» с явно свободными шестикратными участками, которые ориентированы в направлении $\{001\}$ и могут содержать значительное количество компонентов, не входящих в формулу [23].

ZrO_2 – это белый кристаллический оксид циркония, который встречается в минералах бадделеите и цирконе. Оксид циркония может существовать в трех основных фазах:

– кубическая фаза (С) стабильна при температурах выше $2370\text{ }^\circ\text{C}$ и обладает хорошими механическими свойствами и высокой термостойкостью. Используется в производстве огнеупорных материалов, термостойких покрытий и в качестве компонента в керамических изделиях, которые подвергаются экстремальным условиям.

– тетрагональная фаза (Т) стабильна в диапазоне температур от $1170\text{ }^\circ\text{C}$ до $2370\text{ }^\circ\text{C}$. Эта фаза имеет улучшенные механические свойства, что делает ее предпочтительной для многих применений, включая медицинские имплантаты. Широко используется в медицинских имплантатах (например, зубные коронки и эндопротезы), а также в производстве высокопрочных керамических материалов.

– моноклинная фаза (М) стабильна при комнатной температуре и до 1170 °С. Эта фаза имеет более низкие механические свойства по сравнению с тетрагональной и кубической фазами и может влиять на сцепление керамических частиц. Применяется в производстве керамических изделий, где не требуется высокая прочность, а важна стабильность формы и размера [24].

Важно отметить, что переход между фазами может влиять на свойства материалов, и в зависимости от условий синтеза и обработки, ZrO_2 может демонстрировать различные механические и термические характеристики.

Существует множество методов получения ZrO_2 , среди которых наиболее распространены гидролиз солей циркония, золь-гель метод, соосаждение, гидротермальный метод, метод пиролиза.

Гидролиз солей циркония представляет собой химический процесс, в ходе которого соединения типа $ZrOCl_2$ взаимодействуют с водой, а затем подвергаются температурной обработке для синтеза диоксида циркония. Этот метод является экономически выгодным и простым в реализации, однако конечный продукт может иметь неоднородный гранулометрический состав и пониженную степень очистки [25].

Влияние метода синтеза на свойства ZrO_2

Степень очистки диоксида циркония существенно определяется качеством начальных компонентов и параметрами производственного процесса. Гидролизация солевых растворов зачастую вносит нежелательные примеси в конечный материал. Наиболее высокую степень очистки обеспечивают методики соосаждения, золь-гель технологии и гидротермальной обработки.

Диоксид циркония обладает механическими свойствами, сравнимыми с характеристиками нержавеющей стали. Предел прочности на растяжение составляет от 900 до 1200 МПа, а предел прочности на сжатие – до 2000 МПа. Необходимо отметить, что обработка поверхности может значительно изменить физические свойства диоксида циркония. Длительное воз-

действие влаги может негативно сказаться на эксплуатационных характеристиках материала, что известно, как старение диоксида циркония. Также шлифовка поверхности может привести к снижению прочности материала.

Золь-гель технология синтеза позволяет получить оксид циркония с развитой поверхностью и равномерным распределением частиц. Методика базируется на процессах гидролитического разложения алкоксидных соединений циркония, формировании коллоидного раствора, его трансформации в гелеобразное состояние и последующей термической обработке полученного материала [26].

При использовании метода соосаждения совместное выпадение гидроксидов циркония и сопутствующих металлических элементов в процессе химического осаждения из солевых растворов позволяет получить высокочистый диоксид циркония с контролируемым размером частиц [27].

Гидротермальный метод синтеза позволяет получать кристаллический диоксид циркония с заданными морфологическими свойствами. Процесс происходит в специальных реакторах при воздействии температуры и давления, превышающих стандартные условия [28].

Термическое разложение органических соединений циркония осуществляется посредством пиролиза при высоких температурах, в результате чего образуется оксид циркония в контролируемых условиях [29].

Механические свойства диоксида циркония могут ухудшаться со временем, а механические воздействия и воздействие влаги могут ускорить этот процесс. Благодаря явлению переходного упрочнения, ZrO_2 обладает высокой ударной вязкостью, что делает его подходящим материалом для применения в режущих инструментах и биомедицине. Однако его хрупкость остается значительным недостатком.

Эта проблема была частично решена с помощью разработки новых композитных материалов. В последние годы были

созданы материалы, в которых используются углеродные нанотрубки и волокнистые структуры, которые способны повысить вязкость при разрушении благодаря своему волокнистому характеру. Кроме того, электропроводность углерода, в отличие от других неметаллических добавок, открывает дополнительные возможности для использования электрических свойств [30].

Для получения частично стабилизированного диоксида циркония в электронной промышленности широко используется диоксид циркония высокой чистоты, который в природе встречается в виде $ZrSiO_4$. Раствор нитрата циркония получают из цирконового песка с добавлением карбоната гидроксида магния и оксида магния, что снижает содержание растворимого кремнезема. Методы извлечения диоксида циркония включают термическую и химическую дезинтеграцию циркона, с последующей очисткой. Финансово привлекательным является метод термической диссоциации циркона с получением диоксида циркония и кремнезема. Для достижения чистоты до 99,5 % используется щелочное выщелачивание, но требуется дальнейшая химическая обработка. Осаждение сульфатов с раствором сульфата циркония предпочтительнее из-за сложности фильтрации гелеобразных осадков. Для получения качественного диоксида циркония рекомендуется использовать раствор сульфата циркония с высоким содержанием циркония и контролировать pH до 2,0. Полученные композиции представляют собой мелкодисперсные белые вещества после промывки и сушки [31].

Как было отмечено ранее, диоксид циркония формирует три основные кристаллические модификации: моноклинную, тетрагональную и кубическую структуры. Процедура изготовления играет ключевую роль в стабилизации определенной модификации материала. При низкотемпературном гидролизе солевых растворов образуется преимущественно моноклинная фаза, тогда как высокотемпературная обработка способствует формированию тетрагональной или кубической

структуры. Стабилизация конкретной кристаллической модификации диоксида циркония достигается введением добавок оксида иттрия или оксида церия [29]. Методы получения стабилизированного диоксида циркония включают гидролиз солей циркония, золь-гель технологию, осаждение и распылительный пиролиз. Однако некоторые из этих методов ограничены в контроле свойств осадков. Перспективным методом синтеза гидроксидов циркония с заданными характеристиками является осаждение в контролируемых условиях. Буйначев С.В. и соавторами отмечено, что добавление иттрия влияет на свойства осадков и порошков после термической обработки [29]. Также *Herráez-Galindo C.* и соавторы в своем исследовании отметили важность керамики на основе циркония и иттрия, особенно тетрагональных поликристаллов циркония (*TZP*). Авторы подчеркнули, что мелкозернистая структура *TZP* способствует улучшению механических свойств, что делает их особенно привлекательными для использования в высоконагруженных условиях [32].

Морфологические характеристики частиц диоксида циркония, включая размерные параметры и особенности распределения, определяют ключевые свойства материала – площадь активной поверхности, плотностные показатели и механическую устойчивость. Применение золь-гель технологии и гидротермального метода позволяет регулировать гранулометрический состав получаемого продукта при узком диапазоне распределения частиц.

В процессе спекания ZrO_2 происходит конденсация и уплотнение компонентов при высокой температуре, но ниже их температуры плавления. В результате частицы материала преобразуются в жесткую и компактную структуру. На микроуровне могут наблюдаться изменения геометрии, размеров (усадка) и плотности, а также изменения механических свойств, таких как прочность. Для достижения большей компактности и производительности часто требуется больше оборудования и операций спекания. Однако существующие технологии имеют свои

ограничения. Например, изготовление изделий сложной геометрии затруднено из-за необходимости использования пресс-форм, что увеличивает стоимость и время обработки. Кроме того, работа с керамическими материалами представляет собой сложную задачу из-за их высокой твердости и хрупкости. В керамических деталях могут возникать дефекты и нежелательная усадка, что усложняет процесс [33].

Одним из перспективных направлений в области современных материалов являются наночастицы, которые обладают уникальными свойствами и широким спектром применения. В частности, наночастицы оксида циркония отличаются выдающимися механическими свойствами и биосовместимостью, что делает их востребованными в области тканевой инженерии и стоматологии. Несмотря на сложность синтеза, наноцирконий также может быть использован в топливных элементах. Разработка методов осаждения позволяет контролировать форму и кристалличность наночастиц, что повышает эффективность полимерных мембран [34]. В стоматологии актуальна проблема сколов виниров, что подчеркивает необходимость использования нанокристаллической керамики для повышения устойчивости к низкотемпературному разрушению [35].

В настоящее время исследования направлены на создание агломератов наночастиц с использованием метода высокоскоростного кислородно-топливного напыления. Для производства нанопорошков ZrO_2 чаще всего применяют методы мокрого химического синтеза, такие как соосаждение и золь-гель подготовка, тогда как физические методы не обеспечивают необходимых результатов, а газохимические процессы слишком дороги [36]. Также активно изучаются квантовые точки, которые могут быть адсорбированы на поверхности наночастиц ZrO_2 . Это позволяет создавать эффективные фотокаталитические композиты, которые могут быть использованы для быстрого выцветания текстильных материалов.

Учитывая значимость изучения оксида циркония в различных приложениях, мною предложены рекомендации для дальнейших исследований его свойств и характеристик, получаемых различными методами:

– рекомендуется проводить углубленный анализ физико-механических характеристик оксида циркония, синтезированного различными способами. Совершенствование существующих методик синтеза, направленное на получение продукта с улучшенными показателями чистоты, гомогенности структуры и минимальной усадкой при термообработке позволит определить оптимальные параметры материала для конкретных областей применения;

– экологический мониторинг производственных процессов получения оксида циркония требует систематической оценки всех стадий технологического цикла для снижения негативного воздействия на природную среду. Комплексное исследование структурных особенностей материала посредством рентгенодифракционного анализа, электронной микроскопии и спектральных методов обеспечит полное понимание его свойств;

– рекомендуется обеспечить междисциплинарное взаимодействие специалистов материаловедческого, химического и инженерного профилей для комплексного подхода к созданию инновационных технологий на основе оксида циркония. Систематическое сравнение эксплуатационных характеристик оксида циркония с аналогичными материалами позволит определить его преимущества в различных технических областях.

Таким образом, дальнейшее изучение свойств оксида циркония позволит усовершенствовать существующие технологии производства и значительно расширить сферы практического применения материала. Систематические исследования в данном направлении создадут основу для внедрения инновационных решений в различных отраслях промышленности.

Заключение

В результате комплексного исследования методов синтеза оксида циркония были выявлены значительные различия в характеристиках полученных материалов. Анализ данных показал, что каждый метод имеет свои преимущества и недостатки, которые влияют на конечные свойства материала. В частности, применение гидро-термального и солевого методов позволяет достичь оптимальных параметров морфологии поверхности, кристаллической решетки и механической прочности материала, что делает эти методы перспективными для использования при создании высокотехнологичных компонентов.

В представленном научном обзоре была рассмотрена фундаментальная взаи-

мосвязь между методологией синтеза и целевыми характеристиками оксида циркония. Выбор способа получения материала определяется совокупностью требуемых эксплуатационных характеристик конечного продукта и спецификой его практического применения.

В целях повышения функциональных свойств и расширения области применения оксида циркония необходимо направить усилия на разработку новых технологий его синтеза. Исследование взаимосвязи технологических параметров синтеза с физико-химическими свойствами оксида циркония позволит создать научную основу для развития материаловедческих технологий на базе циркониевых систем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Sabbarao E. C. Zirconia - an overview. In: Proc. First Int Conf.: Science and Technology of Zirconia. Cleveland, Ohio; 1981. p. 1-24.
2. Maar J. H. Martin Heinrich Klaproth (1743-1817), a Great, Somewhat Forgotten, Chemist // *Substantia*. 2023. Vol. 7(2). P. 161-178. doi:10.36253/Substantia-2125
3. Wisniak J. Jöns Jakob Berzelius A Guide to the Perplexed Chemist // *Chem. Educ.* 2000. Vol.5. P.343-350. doi:10.1007/s00897000430a.
4. Федоров П. П., Яроцкая Е. Г. Диоксид циркония. Обзор. Конденсированные среды и межфазные границы. 2021. №. 23(2). С. 169–187. doi:10.17308/kcmf.2021.23/3427
5. Обзор циркониевой отрасли России: состояние, проблемы обеспечения сырьем / В.Ю. Хатьков, Г.Ю. Боярко, Л.М.Болсуновская, и др. // *Горные науки и технологии*. 2023. №. 8(2). С. 128–140. doi:10.17073/2500-0632-2023-02-83
6. Раков Э. Г. Цирконий. Химическая энциклопедия в 5 т. Зефиоров Н. С. (гл. ред.). М.: Большая Российская энциклопедия; 1998(5). с. 384-783.
7. Eliwa A. A., Mubark A. E. Effective sorption of U(VI) from chloride solutions using zirconium silico-tungstate matrix. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2021. Vol. 103(16). P. 4079–4097. doi:10.1080/03067319.2021.1921762
8. Варрик Н.М., Ивахненко Ю.А. Особенности получения волокна оксида циркония (обзор). *Труды ВИАМ*. 2015. №10. С. 46-52.
9. Wear Behaviour of Monolithic Zirconia Against Human Enamel – A Literature Review / Badarneh A., Choi J. J. E., Lyons K., et al.// *Biotribology*. 2022. Vol. 32. P. 100224. ISSN 2352-5738. doi:10.1016/j.biotri.2022.100224.
10. Fontolliet A., Al-Haj Husain N., Özcan M. Wear analysis and topographical properties of monolithic zirconia and CoCr against human enamel after polishing and glazing procedures. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2020. Vol. 105. P. 103712. ISSN 1751-6161.
11. Analysis of the Surface Condition and Changes in Crystallographic Structure of Zirconium Oxide Affected by Mechanical Processing / Regulska K, Januszewicz B, Klimek L, et al.//*Materials*. 2021. Vol. 14(14). P. 4042. doi:10.3390/ma14144042
12. Agista M.N., Guo K., Yu Z. A State-of-the-Art Review of Nanoparticles Application in Petroleum with a Focus on Enhanced Oil Recovery. *Applied Sciences*. 2018. Vol. 8(6). P.871. doi:10.3390/app8060871
13. Kim H. Manufacturing and Properties of Various Ceramic Embedded Composite Fabrics for Protective Clothing in Gas and Oil Industries Part I: Anti-Static and UV Protection with Thermal Radiation. *Coatings*. 2023. Vol. 13(9). P. 1481. doi:10.3390/coatings13091481
14. A review on the effect of metal oxide nanoparticles on tribological properties of biolubricants / P. Uniyal, P. Gaur, J. Yadav, et al.// *ACS Omega*. 2024. Vol. 9(11). P. 12436–12456. doi:10.1021/acsomega.3c08279
15. Oxide-Containing Mineral Fibers: Types, Manufacturing Methods, Applications, and Producers (Review) / B.L. Krasnyi, K.I. Ikonnikov, D.O. Lemeshev, et al.// *Glass Ceram*. 2022. Vol. 79. P. 28–36. doi:10.1007/s10717-022-00448-7
16. Application of nanoadsorbents for removal of lead from water / M. Bhatia, R. Satish Babu, S.H. Sonawane, et al.// *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2017. Vol. 14. P. 1135–1154. doi:10.1007/s13762-016-1198-6.
17. Oxide-containing mineral fibers: types, methods of production, application and manufacturers (review) / B. L. Krasnyi, K. I. Ikonnikov, D. O. Lemeshev,

- et al.// *Steklo i keramika*. 2022. Vol. 95(1). P. 39-50. (in Russ). doi:10.14489/glc.2022.01.pp.039-050
18. Керамические материалы на основе диоксида циркония / А. О. Жигачев, Ю. И. Головин, А. В. Умрихин, и др. Под общей редакцией Ю. И. Головина. М.: Техносфера; 2018. 357 с.
 19. Филиппова Л. С., Пикалов Е. С. Исследование физико-механических свойств цирконийсодержащей керамики с повышенной термической и химической стойкостью // *Инженерный вестник Дона*. 2023. № 3(99). С. 327-338. EDN FUHEWD.
 20. Дорохов А. А. Разработка теплоизоляционного материала на основе оксида циркония из газовой фазы и каркаса из оксида алюминия // *Гагаринские чтения 2024: Сборник тезисов докладов 50-ой Международной молодежной научной конференции*. Москва: ООО «Издательство «Перо», 2024. С. 587-588. EDN ACSOKW.
 21. Zirconium oxide (ZrO₂) nanoparticles from antibacterial activity to cytotoxicity: A next-generation of multifunctional nanoparticles / N. Tabassum, D. Kumar, D. Verma, et al.// *Materials Today Communications*. 2021. Vol. 26. P.102156. ISSN 2352-4928. doi:10.1016/j.mtcomm.2021.102156.
 22. Ali A.H. Production of highly purified zirconium oxide from zircon mineral leach liquor using bis-(2-ethylhexyl) phosphate as a promising extractant // *Chem. Pap.* 2022. Vol. 76. P. 6723–6734. doi:10.1007/s11696-022-02339-1
 23. Paramagnetic hole centres in natural zircon and zircon colouration / M. Klinger, U. Kempe, A. Röpl, et al.// *European Journal of Mineralogy*. 2012. Vol. 24. No. 6. P. 1005-1016.
 24. Патент № 2442752 С2 Российская Федерация, МПК C01G 25/00, C01G 25/02, C04B 35/486. Оксид циркония и способ его получения: № 2009109346/05: заявл. 24.07.2007: опубл. 20.02.2012 / Й. Лаубе, А. Гюгель, Р. Оттерштедт; заявитель Х.К. ШТАРК ГМБХ. EDN CRYGGM.
 25. Пойлов В. З., Казанцев А. Л., Черепанова М. В. Физико-химические основы получения композиция 2O₃-ZrO₂ спрей-термогидролизом // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021. Т. 332, № 4. С. 148-158. EDN VZMQAS.
 26. Scalable preparation of hollow ZrO₂ microspheres through a liquid-liquid phase reunion assisted sol-gel method / S. Liang, L. Shen, C. Zhou, et al. // *Ceramics International*. 2020. V. 46– P. 14188–14194.
 27. Comparative Study of Yttria-Stabilized Zirconia Synthesis by CoPrecipitation and Solvothermal Methods / Y. Li, Q. Han, A. Yao, et al. // *JOM*. 2019. Vol. 71 №. 11. P. 3806-3813.
 28. Modified hydrothermal treatment route for high-yield preparation of nanosized ZrO₂ / C. Yang, J. Wen, X. Chen, et al. // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46. P. 19807–19814.
 29. Синтез и исследование свойств порошков диоксида циркония с различным содержанием иттрия / С.В. Буйначев, М.А. Домашенков, М.А. Машковцев, и др. // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2024. №. 30(2). С. 44–54. doi:10.17073/0021-3438-2024-2-44-54
 30. Flexural strength and crystalline stability of a monolithic translucent zirconia subjected to grinding, polishing and thermal challenges / R.H. De Souza, M.R. Kaizer, C.E.P. Borges, et al. // *Ceramic International*. 2020. Vol. 46. No. 16. P. 26168-26175. doi:10.1016/j.ceramint.2020.07.114.
 31. Albarghouti G., Mahmoud Farhan Darwish S. Processing of Zirconia // *IntechOpen*. 2023. doi:10.5772/intechopen.112121
 32. A Review on CAD/CAM Yttria-Stabilized Tetragonal Zirconia Polycrystal (Y-TZP) and Polymethyl Methacrylate (PMMA) and Their Biological Behavior / C. Herráez-Galindo, M. Rizo-Gorrita, S.Maza-Solano, et al.// *Polymers*. 2022. Vol. 14. No. 5. P. 906. doi:10.3390/polym14050906.
 33. A Review of Additive Manufacturing of Ceramics by Powder Bed Selective Laser Processing (Sintering/Melting): Calcium Phosphate, Silicon Carbide, Zirconia, Alumina, and Their Composites / D. Grossin, A. Montón, P. Navarrete-Segado, et al. // *Open Ceramics*. 2021. Vol. 2021. P. 5.
 34. Toorchi D., Khosravi H., Tohidlou E. Synergistic effect of nano-ZrO₂/graphene oxide hybrid system on the high-velocity impact behavior and interlaminar shear strength of basalt fiber/epoxy composite // *Journal of Industrial Textiles*. 2021. Vol. 51. No. 2. P. 277-296. doi:10.1177/1528083719879922.
 35. Synthesis of nano zirconium oxide and its application in dentistry / C. Hu, J. Sun, C. Long, et al.// *Nanotechnology Reviews*. 2019. Vol. 8(1). P. 396-404
 36. The Effect of a Setting Accelerator on the Physical and Mechanical Properties of a Fast-set White Portland Cement Mixed with Nano-zirconium Oxide / Y.Z. Chen, M.J. Yong, V.Y. Tan, et al.// *Eur Endod J*. 2023. Vol. 8. P. 215-24.

REFERENCES

1. Sabbarao EC. Zirconia: an overview. In: *Proc. First Int Conf.: Science and Technology of Zirconia*. Cleveland: Ohio; 1981.
2. Maar JH. Martin Heinrich Klaproth (1743-1817), a great, somewhat forgotten, chemist. *Substantia*. 2023;7(2):161-178. doi:10.36253/Substantia-2125
3. Wisniak J. Jöns Jakob Berzelius. A guide to the perplexed chemist. *Chem. Educ.* 2000;5:343-350. doi:10.1007/s00897000430a.
4. Fedorov PP, Yarotskaya EG. Zirconium dioxide. Review. *Condensed Matter and Interphases*. 2021;23(2):169-187. doi:10.17308/kcmf.2021.23/3427

5. Khatkov VYu, Boyarko GYu, Bolsunovskaya LM. Overview of the zirconium industry in Russia: the state and problems of providing raw materials. *Mining Science and Technology*. 2023;8(2):128-140. doi:10.17073/2500-0632-2023-02-83
6. Rakov EG. Zirconium. *Chemical encyclopedia*. Moscow: Great Russian Encyclopedia; 1998(5).
7. Eliwa AA, Mubark AE. Effective sorption of U(VI) from chloride solutions using zirconium silicostate matrix. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2021;103(16):4079–4097. doi:10.1080/03067319.2021.1921762
8. Varrik NM, Ivakhnenko YuA. Features of obtaining zirconium oxide fiber (review). *Trudi VIAM*. 2015;10:46-52.
9. Badarneh A, Choi JJE, Lyons K. Wear behaviour of monolithic zirconia against human enamel: literature review. *Biotribology*. 2022;32:100224. doi:10.1016/j.biotri.2022.100224.
10. Fontolliet A, Al-Haj Husain N, Özcan M. Wear analysis and topographical properties of monolithic zirconia and CoCr against human enamel after polishing and glazing procedures. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2020;105:103712.
11. Regulska K, Januszewicz B, Klimek L. Analysis of the surface condition and changes in crystallographic structure of zirconium oxide affected by mechanical processing. *Materials*. 2021;14(14):4042. doi:10.3390/ma14144042
12. Agista MN, Guo K, Yu Z. A state-of-the-art review of nanoparticles application in petroleum with a focus on enhanced oil recovery. *Applied Sciences*. 2018;8(6):871. doi:10.3390/app8060871
13. Kim H. Manufacturing and properties of various ceramic embedded composite fabrics for protective clothing in gas and oil industries. *Anti-Static and UV Protection with Thermal Radiation*. *Coatings*. 2023;13(9):1481. doi:10.3390/coatings13091481
14. Uniyal P, Gaur P, Yadav J. A review on the effect of metal oxide nanoparticles on tribological properties of biolubricants. *ACS Omega*. 2024;9(11):12436–12456. doi:10.1021/acsomega.3c08279
15. Krasnyi BL, Ikonnikov KI, Lemeshev DO. Oxide-containing mineral fibers: types, manufacturing methods, applications, and producers (review). *Glass Ceram*. 2022;79:28–36. doi:10.1007/s10717-022-00448-7
16. Bhatia M, Satish Babu R, Sonawane SH. Application of nanoadsorbents for removal of lead from water. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2017;14:1135–1154. doi:10.1007/s13762-016-1198-6.
17. Krasnyi BL, Ikonnikov KI, Lemeshev DO. Oxide-containing mineral fibers: types, methods of production, application and manufacturers (review). *Steklo I Keramika*. 2022;95(1):39-50. doi:10.14489/glc.2022.01.pp.039-050
18. Zhigachev AO, Golovin YuI, Umrikhin AV. Ceramic materials based on zirconium dioxide. Moscow: Technosphaera; 2018.
19. Filippova LS, Pikalov ES. Study of physico-mechanical properties of zirconium-containing ceramics with increased thermal and chemical resistance. // *Engineering Journal of Don*. 2023;3(99):327-338.
20. Dorokhov AA. Development of a thermal insulation material based on zirconium oxide from a gas phase and an aluminum oxide frame. *Collection of papers of the 50th International Youth Scientific Conference, 2024: Gagarin Readings*; Moscow: Pero Publishing House; 2024. pp. 587-588.
21. Tabassum N, Kumar D, Verma D. Zirconium oxide (ZrO₂) nanoparticles from antibacterial activity to cytotoxicity: a next-generation of multifunctional nanoparticles. *Materials Today Communications*. 2021;26:102156. doi:10.1016/j.mtcomm.2021.102156.
22. Ali AH. Production of highly purified zirconium oxide from zircon mineral leach liquor using bis-(2-ethylhexyl) phosphate as a promising extractant. *Chem. Pap.* 2022;76:6723–6734. doi:10.1007/s11696-022-02339-1
23. Klinger M, Kempe U, Pöpl A. Paramagnetic hole centres in natural zircon and zircon colouration. *European Journal of Mineralogy*. 2012;24(6):1005-1016.
24. Laube J, Gugel A, Otterstedt R. RF Patent No. 2442752 C2 МПК C01G 25/00, C01G 25/02, C04B 35/486. Zirconium oxide and method of its preparation. 2012 Febr 20.
25. Poylov VZ, Kazantsev AL, Cherepanova MV. Physico-chemical bases of obtaining the composition of Al₂O₃-ZrO₂ by spray-thermo-hydrolysis. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021;332(4):148-158.
26. Liang S, Shen L, Zhou C. Scalable preparation of hollow ZrO₂ microspheres through a liquid-liquid phase reunion assisted sol-gel method. *Ceramics International*. 2020;46:14188–14194.
27. Li Y, Han Q, Yao A. Comparative study of Yttria-stabilized zirconia synthesis by coprecipitation and solvothermal methods. *JOM*. 2019;71(11):3806-3813.
28. Yang C, Wen J, Chen J. Modified hydrothermal treatment route for high-yield preparation of nanosized ZrO₂. *Ceramics International*. 2020;46:19807–19814.
29. Buinachev SV, Domashenkov MA, Mashkovtsev MA. Synthesis and study of the properties of zirconium dioxide powders with various yttrium content. *Izvestiya. Non-ferrous Metallurgy* 2024. No. 30(2). pp. 44-54. doi:10.17073/0021-3438-2024-2-44-54
30. De Souza RH, Kaizer MR, Borges CEP. Flexural strength and crystalline stability of a monolithic translucent zirconia subjected to grinding, polishing and thermal challenges. *Ceramic International*. 2020;46(16):26168-26175. doi:10.1016/j.ceramint.2020.07.114.
31. Albarghouti G, Mahmoud Farhan Darwish S. Processing of Zirconia. *IntechOpen*. 2023. doi:10.5772/intechopen.112121.

32. Herráez-Galindo C, Rizo-Gorrita M, Maza-Solano S. A review on CAD/CAM yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystal (Y-TZP) and polymethyl methacrylate (PMMA) and their biological behavior. *Polymers*. 2022;14(5): 906. doi:10.3390/polym14050906.
33. Grossin D, Montón A, Navarrete-Segado P. A review of additive manufacturing of ceramics by powder bed selective laser processing (sintering/melting): calcium phosphate, silicon carbide, zirconia, alumina, and their composites. *Open Ceramics*. 2021;2021:5.
34. Toorchi D, Khosravi H, Tohidlou E. Synergistic effect of nano-ZrO₂/graphene oxide hybrid system on the high-velocity impact behavior and interlaminar shear strength of basalt fiber/epoxy composite. *Journal of Industrial Textiles*. 2021;51(2):277-296. doi:10.1177/1528083719879922.
35. Hu C, Sun J, Long C. Synthesis of nano zirconium oxide and its application in dentistry. *Nanotechnology Reviews*. 201;8(1):396-404
36. Chen YZ, Yong MJ, Tan VY. The effect of a setting accelerator on the physical and mechanical properties of a fast-set white portland cement mixed with nano-zirconium oxide. *Eur Endod J*. 2023;8:215-24.

Информация об авторе:

Дорохов Алексей Алексеевич – аспирант 3 курса кафедры ФНСиВТМ, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС».

Dorokhov Aleksey Alekseevich – Postgraduate Student of the College of New Materials in Nust MISIS.

**Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 05.03.2025; одобрена после рецензирования 14.04.2025; принята к публикации 30.04.2025. Рецензент – Сьянов С.Ю., кандидат технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, заместитель главного редактора журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 05.03.2025; approved after review on 14.04.2025; accepted for publication on 30.04.2025. The reviewer is Syanov S.Yu., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, Deputy Editor-in-Chief of the journal *Transport Engineering*.