

КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ. ПОДГОТОВКА СЫРЬЯ, ДОБАВКИ, ТЕХНОЛОГИЯ, СВОЙСТВА

Хакимова Мохира Илхомовна

магистрант филиала

*Министерство науки и высшего
образования Российской Федерации
Филиал РХТУ им. Д.И. Менделеева в г.
Ташкенте (Республика Узбекистан)*

Дустова Мехринисо Пармановна

*преподаватель Навоийского университета
инноваций, г. Навои, Республика Узбекистан*

Ярашов Шохрух

*преподаватель Навоийского университета инноваций,
г. Навои, Республика Узбекистан*

Санакулов Давлат Мухаммад угли

*Студент Навоийского государственного
горно-технологического университета,
г. Навои, Республика Узбекистан*

Аннотация: В статье представлен комплексный анализ механических, термических, износостойких и химических свойств технической керамики на основе оксида алюминия (Al_2O_3). Рассмотрены предел прочности при изгибе и сжатии, твёрдость, ударная вязкость, усталостная прочность, а также поведение материала при высоких температурах. Особое внимание уделено влиянию микроструктуры, пористости и армирующих добавок, таких как ZrO_2 , на повышение трещиностойкости и эксплуатационных характеристик. Приведены основные области применения Al_2O_3 -керамики в машиностроении, энергетике, электронике, химической и медицинской промышленности. Результаты исследования подтверждают высокую эффективность Al_2O_3 -керамики для эксплуатации в условиях повышенных температур и агрессивных сред.

Ключевые слова: оксид алюминия, Al_2O_3 -керамика, механическая прочность, термостойкость, износостойкость, трещиностойкость, микроструктура, композиционные материалы.

Annotatsiya. Mazkur maqolada oksid alyuminiy (Al_2O_3) asosidagi texnik keramikaning mexanik, termik, iznosbardosh va kimyoviy xususiyatlari tizimli ravishda tahlil qilingan. Materialning egilish va siqilishdagi mustahkamligi, qattiqligi, zarbaga chidamliligi, charchoqqa qarshiligi hamda yuqori harorat sharoitidagi barqarorligi ko'rib chiqilgan. Shuningdek, mikrostrukturani boshqarish, porozlikni

kamaytirish va ZrO_2 kabi armirlovchi qo'shimchalar kiritish orqali keramikaning ekspluatatsion ko'rsatkichlarini yaxshilash usullari yoritilgan. Al_2O_3 -keramikaning mashinasozlik, energetika, elektronika, kimyo va tibbiyot sohalaridagi amaliy qo'llanilishi keltirilgan. Olingan natijalar yuqori harorat va agressiv muhitlarda ishlovchi detallar uchun Al_2O_3 -asosli keramikaning istiqbolliligini tasdiqlaydi.

Kalit so'zlar: oksid alyuminiy, Al_2O_3 -keramika, mexanik mustahkamlik, termik barqarorlik, bardoshlik, g'ovaklilik, mikrostrukturani boshqarish, kompozit keramikalar.

Abstract: This paper presents a comprehensive analysis of the mechanical, thermal, wear-resistant, and chemical properties of alumina-based (Al_2O_3) technical ceramics. Key characteristics such as flexural and compressive strength, hardness, fracture toughness, fatigue resistance, and high-temperature stability are examined. Particular attention is paid to the influence of microstructure, porosity, and reinforcing additives, including ZrO_2 , on improving crack resistance and overall performance. The main industrial applications of Al_2O_3 ceramics in mechanical engineering, energy, electronics, chemical processing, and medical technology are discussed. The obtained results confirm the high potential of alumina ceramics for use in high-temperature and aggressive operating environments.

Keywords: aluminum oxide, Al_2O_3 ceramics, mechanical strength, thermal stability, wear resistance, fracture toughness, microstructure control, composite ceramics.

Физико-механические и эксплуатационные свойства керамики на основе Al_2O_3 . Керамика на основе оксида алюминия (Al_2O_3) обладает выдающимися прочностными свойствами, которые обеспечивают её широкое применение в различных отраслях — от машиностроения до медицины и электроники. Основные механические характеристики определяются не только химическим составом, но и степенью чистоты, плотностью, пористостью, структурой и условиями спекания.

Предел прочности при изгибе (сизг)

Один из важнейших параметров при оценке механической прочности керамики.

Для технической керамики на основе Al_2O_3 этот показатель может достигать 300–600 МПа, а в случае высокоплотной мелкозернистой керамики — до 700 МПа и выше.

Предел прочности повышается при уменьшении пористости и зерна, а также при добавлении армирующих фаз (например, ZrO_2).

Пример: Высокоплотная керамика (99,7% Al_2O_3) → сизг \approx 550 Мпа
Керамика 85% Al_2O_3 → сизг \approx 250–350 МПа

Предел прочности при сжатии

Обычно значительно выше, чем при изгибе, и достигает 2000–4000 МПа.

Это объясняется хрупким характером разрушения: при сжатии трещины не распространяются так быстро, как при растяжении или изгибе.

Твёрдость

Керамика на основе Al_2O_3 обладает очень высокой твёрдостью — 8–9 по шкале Мооса, что сопоставимо с корундом и уступает только алмазу.

По Виккерсу до 2000 HV (в зависимости от состава и плотности).

Это делает её устойчивой к абразивному износу и пригодной для резцов, втулок, клапанов и других изнашиваемых деталей.

Ударная вязкость и хрупкость, основной недостаток Al_2O_3 - керамики — её низкая ударная вязкость, то есть склонность к разрушению при ударной нагрузке.

Коэффициент КИС (твёрдость на разрушение) варьируется в пределах 2–5 МПа·м^{1/2}, что ниже, чем у металлов. Для повышения устойчивости к трещинообразованию применяются методы дисперсное армирование (введение ZrO_2 , SiC). Контроль микроструктуры (мелкозернистость, низкая пористость). Композиционные решения (керамические матрицы с металлическими фазами)

Усталостная прочность

При циклической нагрузке прочность материала может снижаться со временем — этот эффект называется усталостью. Керамика из Al_2O_3 демонстрирует устойчивость к усталостному разрушению, особенно при статических нагрузках и в стабильной температурной среде. Однако при высоких термоупругих циклах (нагрев–охлаждение) возможны микротрещины.

Влияние температуры

Прочность сохраняется при температурах до 1000–1200 °С, после чего наблюдается снижение механических характеристик. Тем не менее, по сравнению с полимерами и даже многими металлами, Al_2O_3 - керамика демонстрирует высокую жаропрочность

При температурах выше 1400 °С возможно термическое разрушение при наличии термошока.

Стойкость к износу

Из-за высокой твёрдости и низкого коэффициента трения, керамика из Al_2O_3 применяется в условиях сильного абразивного или эрозионного износа.

Особенно эффективна в поршнях насосов. Направляющих втулках. Механизмах трения в агрессивных средах.

Сравнительные характеристики

Таблица 1- Механические и физические характеристики Al_2O_3 -керамики

Показатель	Значение для Al_2O_3 -керамики
------------	----------------------------------

Предел прочности при изгибе	300–700 МПа
Предел прочности при сжатии	2000–4000 МПа
Твёрдость по Виккерсу	1500–2000 НВ
Ударная вязкость (КИС)	2–5 МПа·м ^{1/2}
Плотность	3,8–4,0 г/см ³
Температура эксплуатации	до 1600 °С

Термостойкость и тепловые характеристики керамики на основе оксида алюминия (Al₂O₃)

Керамические материалы на основе оксида алюминия (Al₂O₃) обладают высокой термической устойчивостью и стабильностью, что делает их идеальными для применения в условиях повышенных температур. Их способность сохранять структуру, форму и функциональные свойства при длительном воздействии тепла является одним из ключевых факторов при выборе таких материалов для технических и промышленных задач[2,3].

Температура эксплуатации и плавления

Температура эксплуатации: керамика Al₂O₃ может использоваться при температурах до 1600 °С, в зависимости от чистоты материала и условий окружающей среды.

Температура плавления оксида алюминия составляет 2050–2072 °С, что значительно выше по сравнению с большинством металлов и полимеров. Температура начала деформации под нагрузкой обычно находится в диапазоне 1400–1500 °С, в зависимости от зернистости, плотности и наличия добавок.

Коэффициент теплового расширения

Оксид алюминия имеет умеренный коэффициент линейного теплового расширения (КТР): ► $\sim 7\text{--}8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ в диапазоне температур от 25 до 1000 °С.

Такой коэффициент обеспечивает хорошую термическую совместимость с рядом других материалов (например, металлами, стеклом). Сравнительно высокую устойчивость к термоударам (особенно в мелкозернистых структурах). Важно резкие перепады температуры всё же могут привести к термическому растрескиванию (особенно при наличии внутренних дефектов).

Теплопроводность

В отличие от большинства других керамик, Al₂O₃ обладает хорошей теплопроводностью, особенно в высокочистых, плотных образцах:

Таблица 2 -Зависимость теплопроводности от содержания Al₂O₃ в керамике

Содержание Al₂O₃	Теплопроводность, Вт/(м·К)
---	---------------------------------------

99,7%	25–35
96%	16–20
<90%	10–15

Высокая теплопроводность обеспечивает эффективный отвод тепла, что особенно важно при использовании в электронной и силовой технике.

Термическая стойкость Al_2O_3 -керамика сохраняет:

Фазовую стабильность при нагревании (не переходит в другие кристаллические фазы до температуры плавления). Химическую инертность даже при высоких температурах.

Механическую прочность при длительном термическом воздействии, особенно в атмосфере инертных газов или вакууме, при термическом старении наблюдается минимальное снижение прочностных характеристик.

Устойчивость к термоциклированию и термоударам

Несмотря на хрупкую природу, оксид алюминия способен выдерживать ограниченное количество термоциклов (нагрев-охлаждение) без разрушения, особенно при мелкодисперсной структуре. Низкой пористости. Отсутствию внутренних дефектов. Устойчивость к термоударам зависит от толщины изделия. Размера и ориентации кристаллитов. Наличия остаточных напряжений. Порог термоудара (ΔT) для плотной керамики от 200 до 300 °С. Для армированных и композиционных — до 500 °С и более.

Сравнение с другими материалами [4]

Таблица 3- Сравнительные термофизические свойства Al_2O_3 , ZrO_2 , стали и кварца

Параметр	Al_2O_3	ZrO_2	Сталь	Кварц
Температура плавления, °С	2050	2700	~1500	~1700
Теплопроводность, Вт/(м·К)	20–30	2–3	~50	1,4
КТР, $10^{-6} K^{-1}$	7–8	10–11	12–14	0,5
Стойкость к термоударам	Средняя	Высокая	Низкая	Очень высокая

Перспективные модификации

Для повышения термостойкости и сопротивления термоударам используют:

Микроармирование оксидом циркония (ZrO_2) — улучшает сопротивление растрескиванию. Фазовые стабилизаторы и добавки (MgO , TiO_2) — для

увеличения структурной стабильности. Гибридные керамики и композиционные материалы, сочетающие Al_2O_3 с металлами или карбидами ($Al_2O_6.3$). Износостойкость и трещиностойкость керамики на основе оксида алюминия. Керамика из оксида алюминия широко применяется в условиях интенсивного механического износа и абразивного воздействия. Её высокая твёрдость, стабильность структуры и химическая инертность обеспечивают отличную износостойкость, но при этом, как и у всех хрупких материалов, присутствует ограниченная трещиностойкость.

Износостойкость

Твёрдость как ключевой фактор Твёрдость Al_2O_3 - керамики достигает 8–9 по шкале Мооса и до 2000 HV по Виккерсу, что позволяет эффективно противостоять абразивному износу. Адгезивному износу. Эрозионному разрушению. Показатели износостойкости

Износостойкость керамики превышает аналогичные характеристики: Стали в 5–10 раз. Полимеров в десятки раз особенно эффективна в парах трения при наличии агрессивной среды (кислот, щелочей, песка, пыли). Факторы, влияющие на износостойкость плотность керамики (чем выше, тем лучше).

Однородность и мелко зернистость структуры. Отсутствие микропор и дефектов спекания.

Трещиностойкость (устойчивость к хрупкому разрушению)

Определение трещиностойкости. Характеризуется параметром K_{IC} — коэффициентом сопротивления распространению трещины (МПа·м^{1/2}). Для чистого Al_2O_3 : K_{IC} = 2–5 МПа·м^{1/2}

Проблемы хрупкости главный недостаток оксидной керамики — её склонность к внезапному хрупкому разрушению. Это особенно критично в условиях: Ударных нагрузок.

Циклических механических воздействий. Повышение трещиностойкости для уменьшения склонности к разрушению применяют: Армирование диоксидом циркония (ZrO_2). При охлаждении происходит трансформация фаз, что вызывает напряжения сжатия в зоне трещины замедляется её рост. Повышение K_{IC} до 7–10 МПа·м^{1/2}. Композиционные материалы:

Введение волокон, чешуек, металлических фаз. Использование Al_2O_3 в составе композиционных керамик (cermet) — повышает как прочность, так и пластичность. Управление микроструктурой: Уменьшение размера зерна → больше межзеренных границ, препятствующих распространению трещины. Контроль пористости → минимизация внутренних дефектов.

Практические области применения износостойкой Al_2O_3 - керамик

Таблица 4 - Применение керамики на основе Al_2O_3 в различных отраслях промышленности

Область	Примеры компонентов
Машиностроение	Направляющие, втулки, подшипники
Горнодобывающая промышленность	Насадки буров, бронеплиты, футеровка
Насосы и трубопроводы	Уплотнительные кольца, валы, прокладки
Текстильная промышленность	Нитины направляющие, сопла, зубцы механизмов
Электроника и энергетика	Изоляторы, опорные элементы в высоковольтных системах
Медицинская техника	Импланты, режущие инструменты, стоматологические фрезы

Сравнение с другими материалами

Таблица 5- Сравнение материалов по твёрдости, трещиностойкости и износостойкости

Материал	Твёрдость (HV)	Трещиностойкость (KIC), МПа·м ^{1/2}	Износостойкость
Al_2O_3 (99,5%)	1800–2000	3–5	Очень высокая
ZrO_2	1200–1500	7–12	Высокая
Сталь (закалённая)	~800–900	>15	Средняя
Карбид кремния (SiC)	>2500	3–4	Очень высокая

Химическая и коррозионная стойкость керамики на основе оксида алюминия (Al_2O_3)

Одним из ключевых преимуществ керамических материалов на основе Al_2O_3 является их высокая химическая инертность и стойкость к коррозионным воздействиям в различных агрессивных средах. Эти свойства делают их незаменимыми в химической, нефтехимической, пищевой и медицинской промышленности, а также в электронике и энергетике.

Химическая инертность

Химическая устойчивость оксида алюминия (Al_2O_3)

Оксид алюминия, или глинозём, — это твёрдое неорганическое соединение, отличающееся очень высокой стойкостью к химическим воздействиям. Он не разрушается и не вступает в реакцию с большинством веществ даже при повышенных температурах. Такая устойчивость связана с его прочной кристаллической структурой и тем, что на поверхности практически нет активных центров, способных реагировать с другими соединениями.

Строение и особенности связи

В состав оксида алюминия входят атомы алюминия и кислорода, соединённые прочными ионно-ковалентными связями. Эти связи образуют плотную решётку, называемую **корундовой структурой**. В такой решётке каждый атом алюминия окружён атомами кислорода, а кислород — атомами алюминия. Это создаёт прочную пространственную сеть, которую очень трудно разрушить. Поэтому Al_2O_3 обладает высокой температурой плавления (около $2050\text{ }^\circ C$) и не растворяется во многих химических средах.

Поведение в различных средах

а) В щёлочах

При обычных температурах глинозём устойчив к действию щелочей и практически не растворяется. Но если взять концентрированный раствор, например, гидроксида натрия ($NaOH$), и нагреть его, то реакция всё же идёт. При этом образуются растворимые соединения — **алюминаты натрия**:



Такой процесс используется в промышленности при переработке бокситов в глинозём (метод Байера).

б) В кислотах

Al_2O_3 устойчив к большинству кислот, включая соляную, серную и азотную. Даже при нагревании он не растворяется, а лишь немного разрушается на поверхности. Исключением является **плавиковая кислота (HF)**. Она реагирует с оксидом алюминия, образуя растворимые фтороалюминаты $Al_2O_3 + 6HF \rightarrow 2H_3[AlF_6]$

Эта особенность связана с высокой реакционной способностью фтора.

в) В органических растворителях

В спиртах, эфирах, бензине и других органических веществах Al_2O_3 полностью инертен. Он не растворяется и не вступает в реакцию, благодаря этому его часто применяют как **адсорбент** — то есть вещество, которое способно удерживать на своей поверхности другие молекулы без химического взаимодействия.

г) В окислительных и восстановительных средах

Оксид алюминия устойчив и к окислителям, и к восстановителям. Алюминий в составе оксида уже находится в самой высокой степени окисления

(+3), поэтому его невозможно дополнительно окислить. А восстановить Al_2O_3 до металлического алюминия можно только при очень высоких температурах — выше $2000\text{ }^{\circ}C$ — и с применением сильных восстановителей, например, углерода.

Плотная структура. Решётка корунда не имеет пор и препятствует проникновению реагентов.

Прочные связи Al–O. Разрушить их можно только при очень большой температуре.

Химическая инертность поверхности. На поверхности нет активных групп, способных вступать в реакцию.

Низкая подвижность ионов. Это замедляет все возможные химические процессы.

Термостойкость. Al_2O_3 не плавится и не разлагается при нагревании, что подтверждает прочность его структуры [2,4,5].

Стойкость к кислотам и щелочам

Кислоты: Al_2O_3 устойчив к большинству минеральных кислот, таких как HCl , H_2SO_4 , HNO_3 , за исключением плавиковой кислоты (HF), которая растворяет оксид алюминия, разрушая керамическую структуру.

Щелочи: В концентрированных, щелочных растворах ($NaOH$, KOH) при высоких температурах возможно медленное разрушение, однако при стандартных условиях материал остаётся стойким.

Устойчивость к коррозии

Благодаря низкой пористости и плотной структуре, Al_2O_3 практически не подвергается коррозии — как химической, так и электрохимической. В агрессивных промышленных средах (кислотные выбросы, солевые растворы, пар) проявляет высокую стабильность. Хорошо подходит для изготовления защитных покрытий и изоляторов в электроэнергетике.

Влияние температуры на химическую стойкость. При повышении температуры скорость химических реакций увеличивается, что может приводить к ускоренному разрушению в некоторых средах. Однако Al_2O_3 сохраняет устойчивость в большинстве сред при температурах до $1500\text{ }^{\circ}C$, что обеспечивает её применение в жаропрочных и химически агрессивных условиях.

Механизмы коррозионной стойкости

Высокая коррозионная стойкость объясняется: Плотной кристаллической структурой. Отсутствием свободных ионов в структуре, способных к обмену с окружающей средой. Низкой пористостью, которая минимизирует проникновение агрессивных сред вглубь материала. Стабильным оксидным слоем на поверхности, препятствующим дальнейшему взаимодействию [1,2].

Ограничения и уязвимые среды несмотря на общую устойчивость, существуют условия, при которых оксид алюминия разрушается: Контакт с HF (плавиковой кислотой).

Влияние концентрированных щелочей при высоких температурах.

Механическое разрушение защитного слоя с последующим проникновением агрессивных сред.

Примеры применения, обусловленные химической стойкостью

Таблица 6 – Применение оксида алюминия (Al_2O_3) в различных отраслях промышленности

Отрасль	Применение
Химическая промышленность	Реакторы, трубопроводы, насадки, клапаны
Нефтехимия	Защитные футеровки, изоляционные детали
Медицинская техника	Биосовместимые импланты, покрытия
Электроника и электроэнергетика	Изоляторы, корпуса, клеммы
Пищевая промышленность	Оборудование для агрессивных сред

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Писчаренко Г. С., Руденко В. Н., Третьяченко Г. Н. И др. Прочность материалов при высоких температурах. Киев: Наукова думка, 1966.300 с.
2. Ахназарова С. Л., Кафаров В. В. Статистические методы планирования и обработки экспериментов. М.: МХТИ им. Д. И. Менделеева, 1972.150 с.
3. Ахназарова С. Л., Кафаров В. В. Методы оптимизации в химии и химической технологии. М., 1985. - 320 с..
4. Lange F. F. Transformation — Toughened ZrO₂. Correlation Between Grain Size Control and Composition in the System ZrO₂ — Y₂O₃ //J. Amer. Ceram. Soc. 1986. - V. 69. - № 3. - P. 240 - 242.
5. Jorgensen P. J., Westbrook J. H. Role of Solute segregation at Grain Boundaries During Final Stage Sintering of Alumina // J. Amer. Ceram. Soc. -1964. Y. 47. - № 7. - P. 332 - 338.
6. Кингери У. Д. Спекание в присутствии жидкой фазы / В кн.: Кинетика высокотемпературных процессов. М.: Металлургия, 1965. - 444 с.
7. Буриев Х. Т., Усманов И. А. Повышение качества строительства в Республике Узбекистан [Электронный ресурс] // Государственный комитет Республики Узбекистан по статистике. – Квартальные отчёты. – Режим доступа: <https://www.stat.uz>