



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки

**ИНСТИТУТ МЕТАЛЛУРГИИ
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ**

**им. А.А. Байкова
Российской академии наук
(ИМЕТ РАН)**

119334, г. Москва, Ленинский пр., 49
Тел. +7 (499) 135-20-60, факс: +7 (499) 135-86-80
E-mail: imet@imet.ac.ru <http://www.imet.ac.ru>
ОКПО 02698772, ОГРН 1027700298702
ИНН/КПП 7736045483/773601001

09.10.2026 г. № 12202- **6215-829/1**

На № _____ от _____

«Отзыв ведущей организации»

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Институт
металлургии и материаловедения
им. А.А. Байкова Российской
академии наук,
Чл.-корр. РАН

В.С. Комлев

2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук на диссертационную работу Абзалова Данила Илдусовича «Самораспространяющийся высокотемпературный синтез оксинитрида магния-алюминия и получение прозрачной керамики на его основе», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

1. Актуальность диссертационной работы

Одной из приоритетных задач современного материаловедения является создание прозрачных керамических материалов, сочетающих высокие оптические, механические и теплофизические характеристики. Традиционные оптические материалы – стекла и монокристаллы – имеют фундаментальные ограничения по прочности, термостойкости и возможности получения крупногабаритных изделий сложной формы. Прозрачная керамика, напротив, позволяет преодолеть эти ограничения, обеспечивая высокую твердость,

устойчивость к механическим и термическим воздействиям и широкий спектральный диапазон пропускания.

Среди перспективных материалов для прозрачной керамики особое место занимает оксинитрид магния-алюминия (MgAlON), который представляет собой твердый раствор в тройной системе $\text{AlN-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$. Однако широкое применение MgAlON ограничивается отсутствием эффективных, энергосберегающих и масштабируемых методов синтеза. В настоящее время в основном для получения порошков MgAlON используется твердофазный синтез и карботермическое восстановление, которые характеризуются длительными выдержками при высоких температурах, сложностью оборудования и значительными энергозатратами.

В этой связи диссертационная работа Абзалова Д.И., направленная на разработку научных основ получения порошков оксинитрида магния-алюминия методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и последующей их консолидации в прозрачную керамику, является, несомненно, актуальной. Предложенный подход позволяет существенно сократить время синтеза, снизить энергопотребление и получить продукт с заданными свойствами.

Цель и задачи работы

Целью работы является разработка метода синтеза порошков оксинитрида магния-алюминия (MgAlON), консолидация их в плотную прозрачную керамику, а также исследование теплофизических и механических свойств полученных материалов.

Для достижения поставленной цели автором решен комплекс взаимосвязанных задач, включающий исследование макрокинетических параметров горения смесей $\text{Al+Al}_2\text{O}_3\text{+MgO+Mg(ClO}_4)_2\text{/KClO}_4$, определение оптимальных условий синтеза оксинитрида магния-алюминия, исследование процессов спекания и консолидации полученных порошков MgAlON , исследование механических и теплофизических свойств полученных материалов.

Содержание работы

Диссертация Абзалова Д.И. объемом 147 страниц состоит из введения, пяти глав, общих результатов и выводов, списка литературы из 167 наименований и приложения. Работа иллюстрирована 60 рисунками и 18 таблицами.

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель и задачи работы, представлены научная новизна и практическая значимость результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 представляет собой развернутый литературный обзор, в котором дан анализ современного состояния исследований в области прозрачной керамики на основе AlON, MgAl₂O₄ и MgAlON. Рассмотрены методы синтеза порошков, их преимущества и недостатки, проанализированы подходы к спеканию керамических материалов. Проведено систематическое сравнение свойств керамик AlON, MgAl₂O₄ и MgAlON. Отмечено отсутствие в доступной литературе работ по синтезу оксинитрида магния-алюминия методом СВС, что подчеркивает новизну проведенного исследования.

Глава 2 представляет собой методическую часть работы, в которой описаны исходные материалы, оборудование (СВС-реактор, СВС-газостат, высокотемпературная печь), методики приготовления шихты и проведения синтеза, а также методы исследования продуктов горения и спеченной керамики. Автором предложен оригинальный подход к расчету составов шихты, основанный на представлении системы MgAlON в виде двойной системы AlON-MgAl₂O₄. Для обеспечения устойчивого распространения волны горения использована химическая активация смеси высокоэкзотермическими добавками – перхлоратами магния и калия.

Глава 3 посвящена синтезу MgAlON с использованием Mg(ClO₄)₂. Проведены систематические исследования влияния начального давления азота (5-60 МПа) на макрокинетические параметры горения и фазовый состав продуктов. Установлена зависимость температуры и скорости горения от

давления с максимумом при 20 МПа. Автор связывает это с увеличением количества азота в порах образца, подтверждая вывод расчетами стехиометрического давления азота с учетом разложения перхлората магния, которое составило 16,8 МПа. Дальнейшее увеличение давления азота приводит к снижению параметров горения, что автор логично объясняет избыточным количеством азота в реакционной зоне, в результате чего значительная часть тепловой энергии расходуется на нагрев азота. Методом термодинамического расчета и прямыми экспериментами количественно оценен вклад реакций азотирования и окисления алюминия в тепловой баланс. Показано, что реакция окисления оказывает более значительное влияние на температуру и скорость горения, тогда как азотирование лимитируется фильтрационными затруднениями. Изучены влияние грануляции шихты, дисперсности алюминиевого порошка на фазовый состав и микроструктуру продуктов горения.

Глава 4 посвящена синтезу MgAlON с использованием KClO_4 . Методика исследований аналогична 3 главе диссертационной работы, поэтому автор провел сравнительный анализ двух типов окислителей, показавший, что при использовании KClO_4 температура и скорость горения выше ($\sim 100^\circ\text{C}$ и 0,5-1,5 мм/с), что обусловлено гигроскопичностью $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$. Для исследования влияния гигроскопичности автор провел расчеты в программе Thermo, где на 1 моль перхлората магния добавил 2 моля воды, результаты расчетов подтвердили значительное влияние связанной с $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ воды. При исследовании фазового состава продуктов горения было обнаружено присутствие фазы KCl , которая, как отмечено автором, удаляется промыванием водой или испаряется на этапе спекания при температуре 1420°C . На основе полученных экспериментальных и расчетных данных установлена корреляция тепловыделения и температуры горения, позволяющая рассчитывать составы для синтеза MgAlON с заданным содержанием AlON и MgAl_2O_4 .

Глава 5 является завершающим этапом исследования, в котором

полученные СВС-порошки MgAlON были успешно консолидированы в прозрачную в ИК-диапазоне керамику. Для спекания были выбраны порошки трех составов с различным расчетным соотношением $\text{AlON}/\text{MgAl}_2\text{O}_4$ в MgAlON . Спрессованные образцы выдерживали в высокотемпературной печи в среде азота в течение 10 часов при трех температурах: 1830, 1880 и 1930 °С. При изучении плотности образцов после спекания было установлено, что максимальной плотностью обладают образцы, полученные при различной температуре спекания в зависимости от состава. Так, для состава с большим расчетным содержанием AlON максимальной плотностью обладал образец, спеченный при максимальной температуре спекания – 1930 °С, а для состава с большим расчетным содержанием шпинели MgAl_2O_4 наоборот при минимальной температуре спекания – 1830 °С. При исследовании светопропускания было установлено, что некоторые образцы MgAlON в ИК-диапазоне достигают прозрачности более 50%. При этом автор отметил, что данные по максимальному светопропусканию коррелируют с данными по максимальной плотности, что имеет важное практическое значение: плотность может служить надежным индикатором оптических свойств материала на стадии контроля качества. Проведены систематические исследования теплофизических и механических свойств полученной керамики, установлены зависимости коэффициента термического расширения, теплопроводности, твердости и трещиностойкости от элементного состава MgAlON . При смещении состава в сторону алюмомагниевого шпинели КТР, коэффициенты температуропроводности и теплопроводности увеличиваются. При этом при смещении состава в сторону оксинитрида алюминия увеличиваются твердость по Виккерсу, трещиностойкость и микротвердость.

Полученные результаты показывают, что предложенный в диссертационной работе метод синтеза является пригодным для получения керамики на основе оксинитрида магния-алюминия, прозрачной в ИК-диапазоне.

2. Научная новизна и практическая значимость работы.

Научная новизна работы заключается в следующем:

Впервые разработан способ получения однофазных порошков MgAlON методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза;

Экспериментально-расчетным методом оценен вклад реакций азотирования и окисления алюминия на процессы синтеза. Показано, что реакция окисления оказывает более значительное влияние на горение смесей;

Выявлена корреляция тепловыделения и температуры горения, позволившая разработать подход к целенаправленному синтезу MgAlON с заданным элементным составом;

На основе синтезированных порошков получена прозрачная керамика со светопропусканием более 50 % в ИК-диапазоне;

Установлены зависимости теплофизических и механических свойств от элементного состава, в частности, увеличение твердости с 13,6 до 15,2 ГПа и трещиностойкости с 1,9 до 2,2 МПа $\cdot\sqrt{\text{м}}$ при смещении состава в сторону AlON , и рост теплопроводности с 11 до 14 Вт $\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ и КТР с 9,28 до 9,64 $\cdot 10^{-6}$ К $^{-1}$ при смещении в сторону шпинели.

3. Значимость полученных автором диссертации результатов для развития соответствующей отрасли науки.

Значимость полученных автором диссертации результатов для развития технологии прозрачных керамических материалов с использованием метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), как отрасли наук, заключается в следующем:

- Разработан способ получения однофазного порошка оксинитрида магния-алюминия различного состава методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза при использовании смесей Al , Al_2O_3 , MgO с перхлоратом магния и калия в газообразном азоте.

- Экспериментально-расчетным методом установлена степень влияния реакций азотирования и окисления алюминия на макрокинетические параметры горения изученных смесей. Установлена корреляция температуры горения с суммарным тепловыделением реакций азотирования и окисления

алюминия, что позволяет для заданного значения температуры горения определять состав исходной смеси.

- Определена оптимальная температура спекания (в интервале 1830-1930 °C) для различных составов MgAlON. Установлено, что при увеличении расчетного содержания алюмомагниевой шпинели в составе порошков оптимальная температура спекания снижается.

4. Практическая значимость результатов работы.

1. Предложенный способ синтеза порошков MgAlON методом СВС является основой для разработки технологии, позволяющей масштабировать (продемонстрирована возможность получения 0,2 кг порошка за один синтез) производство порошков MgAlON различных составов.

2. Разработан способ получения оптически прозрачных керамических материалов (патент РФ на изобретение № 2815897 от 17.05.2023 г.).

3. Установлена зависимость свойств керамики (твердость, трещиностойкость, теплопроводность и коэффициент термического расширения) от элементного состава синтезированных порошков MgAlON, позволяющая прогнозировать свойства керамических изделий.

5. Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается применением комплекса взаимодополняющих методов исследования: рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии, метода БЭТ, термогравиметрии, дилатометрии, инфракрасной спектроскопии и стандартизованных механических испытаний. Экспериментальные данные получены на сертифицированном оборудовании, воспроизводимость подтверждена сериями экспериментов. Результаты термодинамических расчетов согласуются с экспериментальными данными, а выявленные расхождения автором аргументированно объясняются. Апробация работы на российских и международных конференциях, а также публикации в рецензируемых журналах, подтверждают обоснованность выносимых на защиту положений.

6. Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Полученные автором результаты имеют существенное значение для развития важнейших отраслей промышленности Российской Федерации, изготавливающих средства производства и автоматизации: двигатели и турбины, агрегаты с высоконагруженными деталями и т.п., а также в некоторых направлениях производства специальной техники. Теоретические заключения и конкретные данные, полученные в работе, могут быть использованы ПАО «КМЗ» (г. Красногорск), АО «НИИГрафит» (г. Москва), ПК «Салют», ОКБ им. А. Люльки, ПАО «ОДК-УМПО» (г. Москва), ОНПП «Технология» (г. Обнинск Московской обл.), в ВУЗах технического профиля в процессе подготовки специалистов по направлениям «Химическая технология» и «Материаловедение и технологии материалов», при выполнении научно-исследовательских работ.

7. Личный вклад автора

Все результаты, представленные в работе, получены лично автором или при его непосредственном участии. Автором выполнен анализ литературных данных, проведены экспериментальные исследования по синтезу оксинитрида магния-алюминия, его спеканию и проведена обработка полученных результатов, их обобщение и подготовка научных публикаций.

8. Вопросы и замечания по диссертационной работе

1. Трехкомпонентная фазовая диаграмма, приведенная автором, на самом деле является концентрационным треугольником, из которого сложно сделать однозначный вывод, каким фазам соответствуют рассматриваемые составы;
2. На приведенных рентгеновских дифрактограммах однозначно фиксируется только фаза алюмомагниевого шпинели. Аналитические данные о составе фаз Mg-содержащих алонов в системе Mg-Al-O-N отсутствуют, указаны только предполагаемые расчетные стехиометрические коэффициенты на основе содержания исходных компонентов (таблица 6, 7, 12, 13, 14);

3. Значения светопропускания приведены в технических единицах, что является характеристикой исследуемого образца, а не характеристикой материала;
4. На стр. 59 говорится, что расчетное количество азота, необходимое для полного азотирования алюминия в поровом пространстве образца, достигается уже при начальном давлении азота 4,7 МПа. Вместе с тем, экспериментальные данные показывают дальнейшее увеличение температуры и скорости распространения фронта горения вплоть до 20 МПа. Чем объясняется существенное влияние повышения давления азота в диапазоне 4,7–20 МПа после достижения расчетного количества газа, необходимого для полного азотирования алюминия? Можно ли в данном случае говорить не только об увеличении доступного количества азота, но и об изменении условий тепломассопереноса и кинетики процесса?
5. На стр. 59 имеется техническая неточность в описании расчета давления газа в поровом пространстве образца. При записи уравнения состояния идеального газа: $P=mRT/(MV)$ автор указывает, что величина (m) представляет собой массу образца, равную 20 г, тогда как в данном уравнении (m) должна характеризовать массу соответствующего газообразного компонента, находящегося в рассматриваемом (поровом) объеме, а не массу твердого образца. В существующем виде физический смысл величины (m) в уравнении (4) изложен неоднозначно, что затрудняет проверку достоверности последующего расчета давления газа в порах.
6. На стр. 69–70 для оценки вклада реакций окисления и азотирования алюминия используется разность между экспериментальной температурой горения и рассчитанной адиабатической температурой. Насколько обоснованным является определение вклада отдельной химической реакции непосредственно по разности экспериментальной и расчетной температур? Учитывались ли при такой оценке тепловые потери, неполнота протекания реакций и ограничение поступления газообразного азота в зону реакции?
7. На стр. 110 в качестве одного из условий получения прозрачной керамики

указывается остаточная пористость менее 1 %, а на стр. 120 приведены результаты измерения светопропускания полученных образцов MgAlON. Какова фактическая остаточная пористость исследованных образцов и каким образом установлено, что именно пористость, а не вторичные фазы, примеси или границы зерен, является определяющим фактором наблюдаемого светопропускания?

9. Заключение

На основании рассмотрения диссертации, автореферата, опубликованных работ и заслушанного доклада, ведущая организация считает, что диссертационная работа Абзалова Данила Илдусовича «Самораспространяющийся высокотемпературный синтез оксинитрида магния-алюминия и получение прозрачной керамики на его основе» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, имеющие существенное значение для развития материаловедения в области создания прозрачных керамических материалов на основе оксинитрида магния-алюминия.

Диссертационная работа «Самораспространяющийся высокотемпературный синтез оксинитрида магния-алюминия и получение прозрачной керамики на его основе» соответствует паспорту научной специальности: 1.3.17 – «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества» (отрасль науки – технические), в частности направлениям исследований:

- п. 1. «... поведение веществ и структурно-фазовые переходы в экстремальных условиях – в условиях статического и динамического сжатия...»;
- п. 4. «Закономерности и механизмы распространения, структура, параметры и устойчивость волн горения...», «связь химической и

физической природы веществ и систем с их термохимическими параметрами, характеристиками горения...», «...макрокинетика процессов горения...»;

- п. 5. «...процессы горения и взрывчатого превращения в устройствах и аппаратах для получения веществ и продуктов; управление процессами горения и взрывчатого превращения».

По объёму полученных результатов, научной новизне и практической значимости диссертационная работа Абзалова Данила Илдусовича на тему: «Самораспространяющийся высокотемпературный синтез оксинитрида магния-алюминия и получение прозрачной керамики на его основе» по актуальности тематики, объёму полученного экспериментального материала, его новизне, научной и практической значимости соответствует требованиям п.п. 9-14 Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор, Абзалов Данил Илдусович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Диссертационная работа Абзалова Данила Илдусовича рассмотрена и обсуждена в ИМЕТ РАН на расширенном заседании Секции Ученого совета ИМЕТ РАН «Неорганическая химия и керамические материалы» (15 сентября 2026 г., протокол № 3/26). Отзыв составлен на основании диссертации, автореферата и публикаций Д.И. Абзалова.

Ведущий научный сотрудник лаборатории новых технологий металлических и керамических материалов (№ 4) федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук», доктор технических наук

(Специальность 2.6.14 Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов),



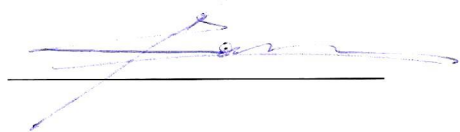
/Чернявский Андрей Станиславович/

Заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник лаборатории физикохимии тугоплавких и редких металлов и сплавов (№ 12) федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук», доктор технических наук (Специальность 2.6.1 Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов),



/Кольчугина Наталья Борисовна/

Секретарь секции Учёного Совета ИМЕТ РАН «Неорганическая химия и керамические материалы», кандидат технических наук (Специальность 2.6.14 Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов),



/Фомин Александр Сергеевич/

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН)

Адрес: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, 49

Телефон: +7 (499) 13 5-20-60

Адрес электронной почты: imet@imet.ac.ru

Сайт: <https://www.imet.ac.ru/>