



МРНТИ 31.15.25

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2024-149-4-67-78>

Научная статья

Процесс сгорания в присутствии твердотопливного катализатора Ti_3C_2 (MXene) на основе перхлората аммония

Ж. Коркембай^{1*} , А.Н. Алипбаев² , З.А. Мансуров³ 

^{1,3}Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан

¹Казахский национальный медицинский университет им. С.Д. Асфендиярова, Алматы, Казахстан

(E-mail: ^{1*}janibek_kk@mail.ru, ²amanbol-87@mail.ru, ³ZMansurov@kaznu.kz)

Аннотация.

Учитывая потребность космических материалов в твердом топливе, их развитие, имеет большое значение совершенствование материалов топлива. Улучшая каталитическую активность катализаторов, используемых в существующих твердых топливах, можно уменьшить последствия, вызванные неблагоприятными характеристиками горения. Каталитические свойства Ti_3C_2 (MXene) двумерных карбидов переходных металлов, имеющих особую структуру, вызывают большой интерес. В этой работе мы рассмотрели каталитическое влияние максина Ti_3C_2 (MXene) на сгорание композитного твердого топлива на основе перхлората аммония. Сжигали образцы в устройстве высокого давления при различных давлениях аргона. Ход горения снимали на высокоскоростную видеокамеру, а температуру измеряли с помощью пирометра. При анализе графика, построенного по полученным значениям параметров, наблюдается улучшение массы и теплообмена при сгорании твердого топлива на основе перхлората аммония с добавлением максена Ti_3C_2 (MXene).

Ключевые слова: Нанопорошки Ti_3C_2 (MXene). Перхлорат аммония (ПА). Каталитическая активность. Кинетические параметры. Твердое топливо.

Поступила: 9.10.2024. Одобрена: 30.11.2024. Доступна онлайн: 31.12.2024.

* Автор-корреспондент

Введение

Перхлорат аммония – это топливо, состоящее из жидкого горючего, выдает высокую энергию, способную к самопроизвольному иницированию горения, поскольку аммиак и соляная кислота распадаются на поверхности, поддерживая

пламя в газовой фазе с температурой адиабатического пламени около 1400 К. ПА также обладает уникальными характеристиками действия разложения и горения при низких температурах под давлением из-за важности конденсированных фазовых реакций [1]. Эти свойства превратили перхлорат аммония в основной состав композитного твердого топлива, используемого для двигателей космических летательных аппаратов. Однако, несмотря на длительное использование в ракетном топливе, оптимизация сгорания композитного твердого топлива на основе перхлората аммония по-прежнему требует многочисленных научных исследований.

Развитие ракетных технологий воспринимается как важный исследовательский аспект в аэрокосмической промышленности. В последнее время наиболее часто используемые ракеты для коротких и средних дальностей оснащены топливом. Пропелленты широко используются в системах химического возбуждения и являются основным источником доставки химической энергии (движущей силы) к ракетам [2].

Твердое топливо состоит из нескольких химических ингредиентов, таких, как окислитель, топливо, связующее, пластификатор, отвердитель, стабилизатор и сшивающий связующий агент. Точный химический состав зависит от характеристик горения, необходимых для конкретного применения. Два основных вида топлива (однородные и неоднородные) различаются по условиям взаимодействия их составных частей. В однородном топливе ингредиенты химически связаны, а полученная физическая структура везде однородна. Типичными примерами однородного топлива являются одноосновное (нитроцеллюлоза) или двухосновное (нитроцеллюлоза и нитроглицерин) топливо. В гетерогенном или составном топливе ингредиенты физически смешиваются, что приводит к гетерогенной физической структуре. Оно состоит из кристаллических частиц, которые действуют как окислители, и органического пластикового топлива, которое действует как связующее для склеивания окисляющих частиц [3].

Современные высокоэнергетические двигатели используют композитное твердое топливо, состоящее из энергетического наполнителя (10-20%) в качестве окислителей (65-70%), связующих металлических топлив (8-15%) и катализаторов скорости горения (КСГ) (2-5%). Окислители, часто богатые кислородом кристаллические неорганические перхлораты (например, перхлорат аммония (ПА)) и металлическое топливо (алюминий (Al)), служат для производства энергии за счет их взаимодействия [2].

Регулирование производительности горения твердого топлива было давней проблемой в области ракетостроения. Общий метод, используемый для решения этой проблемы, заключается в использовании катализаторов сгорания в топливе для оптимизации тяговой мощности [4]. В этой области существуют различные синтезированные катализаторы горения, такие, как оксиды или фториды переходных металлов, свинцово-медные соли органических кислот, координационные комплексы металлоорганических соединений, соли аммония и органические амины, ферроцен и его производные, соли меди и их хелаты. Несмотря на достигнутый прогресс, традиционные методы выбора и введения катализаторов по-прежнему не соответствуют требованиям к применению и могут поставить под угрозу топливные характеристики. Это связано с тем, что важно отметить, что необходимость модификации поверхности включает добавки, снижающие уровень энергии топлива, что приводит к снижению производительности двигателя [5].

Композитное твердое топливо на основе ПА требует модификаторов горения для достижения высокой скорости горения, в то время как обычные оксиды металлов используются в качестве модификаторов скорости горения [6, 7]. Использование

сверхтонкого ПА может в некоторой степени улучшить характеристики топлива. Тем не менее, ПА изготовлен из одного типа сильного окислителя, и приготовить очень тонкий ПА очень опасно и сложно [8]. Следовательно, производительность композитного твердого топлива на основе ПА может быть улучшена путем добавления небольшого количества нанокатализатора к частицам ПА [9, 10]. Чтобы повысить эффективность катализаторов сгорания, исследователи разработали наноразмерные катализаторы, которые увеличивают поверхностно-активные области, соприкасающиеся с катализируемым веществом, что увеличивает каталитическую емкость [11].

Важно отметить, что сгорание композитного твердого топлива на основе ПА зависит от исходных условий топлива и условий окружающей среды, поэтому композитный состав сжигался при атмосферном давлении каждого типа. В этой статье представлен обзор экспериментальных и вычислительных методов, используемых для изучения каталитического воздействия катализатора Ti_3C_2 (MXene) на горение гетерогенного твердого топлива на основе перхлората аммония (ПА). Исследование рассматривается в несколько этапов. Во-первых, для полного обеспечения характеристики сложного многофазного хода горения в композитной системе подробно дается каждый процесс. Далее предлагается экспериментальная диагностика, которая использовалась для изучения каждого из этих процессов. Затем предлагается краткое изложение анализа результатов горения твердого топлива на основе перхлората аммония. Наконец, делаются выводы по текущему пониманию.

Материалы и методы

Чистота 98,8%, порошок NH_4ClO_4 (перхлорат аммония) со средним размером частиц 50 мк, чистота 99,5%, алюминиевый порошок со средним размером частиц 44 мк и исходный порошок [Ti_3AlC_2 (MAX)] для получения катализатора Ti_3C_2 (MXene), плавиковая кислота (HF, 40%), полиуретан (ПУ) силлагерм, двухкомпонентная жидкость 6030. Была переработана в качестве связующего. В этих экспериментах использовалась деионизированная вода.

Приготовление композитного твердого топлива на основе ПА

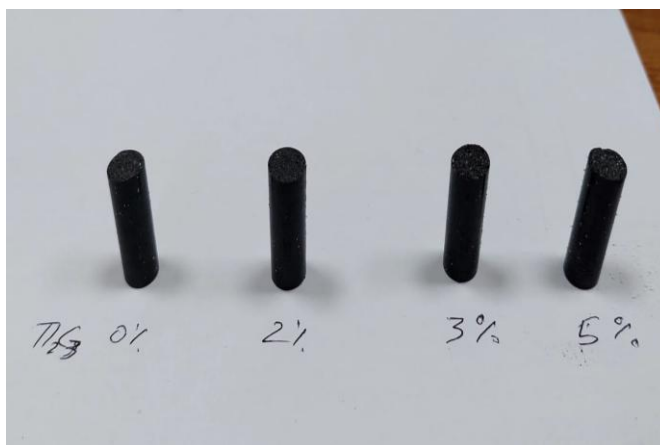
К настоящему времени было проделано много исследовательских работ по оптимизации сгорания твердого топлива на основе перхлората аммония. Однако, учитывая частичную или полную замену перхлората аммония в качестве основного окислителя топлива, когда говорят, что эпоха твердого топлива с перхлоратом аммония уходит в прошлое, критическое понимание новых систем, на наш взгляд, требует возвращения к этой проблеме. В композитных твердых топливах, используемых в современных твердотопливных ракетных двигателях, в качестве окислителей обычно используются ПА, связующее на полимерной основе и алюминиевый порошок [12]. Мы провели исследования, в том числе путем замены Ti_3C_2 (MXene) вместо оксидов металлов (катализатора) в составе композитного твердого топлива, полученных на основе обзора литературы, в том числе экспериментальных и теоретических работ. Состав твердого топлива на основе NH_4ClO_4 (ПА) представлен в таблице ниже.

Таблица 1. Компоненты твердого ракетного топлива на основе перхлората аммония в процентах (%) от веса

Образец, №	Состав, %			
	Ti ₂ C ₃	Al	NH ₄ ClO ₄	ПУ
1	0	18	60	2.2
2	2	18	58	22
3	3	18	57	22
4	5	18	55	22

По массовым долям химических реагентов, указанным в таблице 1, подготовлены четыре типовых образца. При приготовлении образца нужной массы химическое соединение: Ti₂C₃, Al, и NH₄ClO₄ взвешивают массы по стехиометрических составов, изготавливают и перемешивают в агатовой ступке.

Далее поверх полностью перемешанных порошков наливают связующий полиуретан (ПУ) и перемешивают. Полностью увлажненная масса образца приводится в форму в цилиндрической форме (как показано на рисунке 1). Подготовленные образцы сушат в вакуумной среде в течение двух суток.

**Рисунок 1. Образцы твердого топлива, изготовленные в каждом процентном соотношении Ti₃C₂ (MXene)**

Остановимся на способе подготовки использованного для экспериментальной работы катализатора [Ti₃C₂ (MXene)]. Ранее мы писали, что порошок [Ti₃AlC₂ (MAX)] опосредуется химической реакцией с плавиковой кислотой (HF). Более подробную информацию об этом можно посмотреть в литературе [13].

Сжигание твердого топлива на основе перхлората аммония в установке высокого давления

Скорость горения твердого ракетного топлива будет зависеть от различных факторов. Повышение давления в камере сгорания является одним из наиболее важных факторов, повышающих скорость горения. По мере увеличения давления в камере сгорания профиль горящего пламени изменяется; количество пламени уменьшается и горит быстрее [14]. По компонентам твердого топлива ракеты, приведенным в таблице-1, подготовлены образцы, и с целью изучения действия горения в устройстве высокого давления проведена серия испытаний горения при камерных давлениях 1, 20, 40, 60 атм.

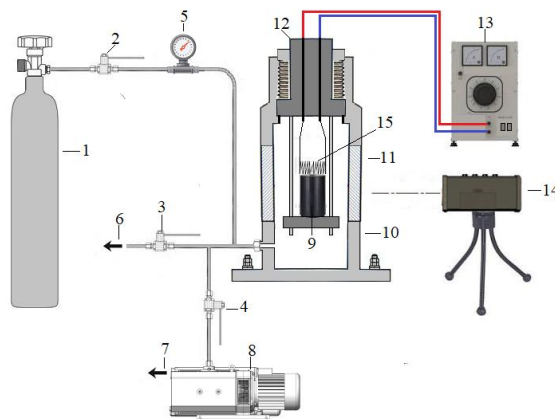


Рисунок 2. Схема сжигания твердого топлива на основе перхлората аммония в установке высокого давления:

1 - аргон, 2, 3, 4, - вентиль для газа, 5 - манометр, 6, 7 - выход газа, 8 - вакуумный насос, 9 - образец для сжигания, 10 - установка высокого давления, 11 - окно для контроля, 12 - открывающийся и закрывающийся колпак, 13 - трансформатор, 14 - пирометр, 15 - нагревательная спираль

Испытания сжигания твердого топлива проводились на лабораторной установке высокого давления, как показано на рисунке 2. Скорость горения твердого топлива можно принять за расстояние горения в единицу времени. Как правило, в качестве единицы скорости горения используются мм/с, см/с и дюйм/с [14]. Поэтому с целью расчета скорости горения измеряется, прежде всего, высота, диаметр образцов. Затем мы наносим на установку высокого давления при давлениях 1 атм, 20 атм и 40 атм. Весь ход горения фиксируется в видеокамере, а температура измеряется с помощью пирометра.

Методы анализа образцов

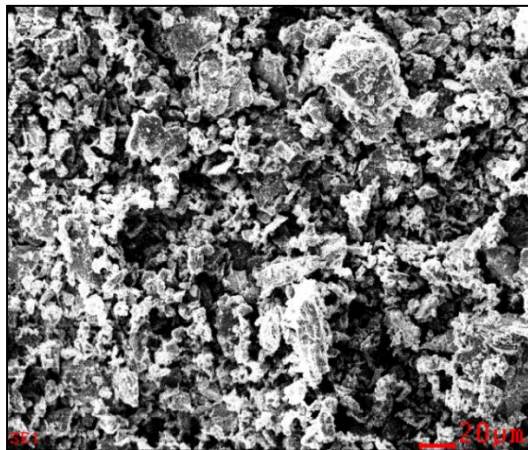
СЭМ анализ. Микроструктура образцов изучалась методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) в двойной системе Quanta 3D 200i с ускорительным напряжением 15 кВ.

Результаты и обсуждение

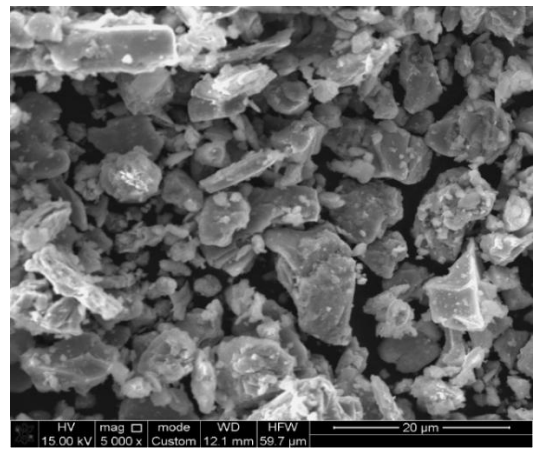
Морфология и элементный состав Ti_3AlC_2 (MAX) и Ti_3C_2 (MXene) были продемонстрированы с помощью детектора СЭМ, ЕДХ. Как показано на рисунках СЭМ (рис. 4а, б), мы видим, что структура Ti_3C_2 (MXene) представляет собой слоистые структурные наночастицы. А если посмотреть на картины (рис. 3а, б) Макса (Ti_3AlC_2 (MAX)), то такой принципиальной особенности не наблюдается. Показан элементный состав образцов по детектору ЕДХ. Элементный состав синтезированного катализатора ЕДХ-анализ (рис. По 4С, d) 12,27. 9,31. 20,72. 6,55. 51,15% указывает наличие С, О, F, Al, и Ti в дробях.

Двумерные (2D) материалы обладают уникальными химическими и физическими свойствами, в отличие от традиционных сыпучих материалов, благодаря своей уникальной плоской структуре [15]. По сравнению с другими катализаторами на основе металлов, Ti_3C_2 и Ti_3N_2 имеет сильную термическую стабильность, которая относится к каркасу $M_{n+1}X_n$, образованному слоями атома углерода (С) и атомными слоями переходного металла (Ti) [16]. MXenes играет ключевую роль во многих типичных тепловых реакциях в качестве катализатора [17]. Благодаря высокой

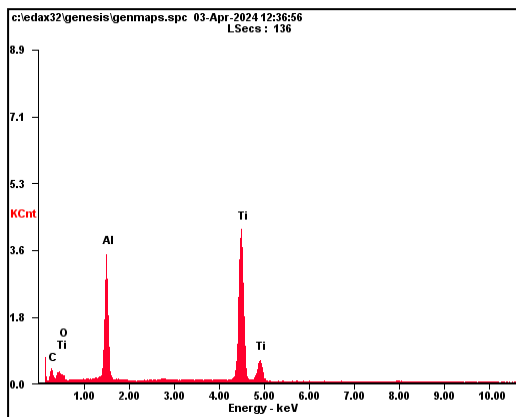
термостойкости и уникальной структуре он демонстрирует некоторые преимущества по сравнению с традиционными катализаторами.



a



b

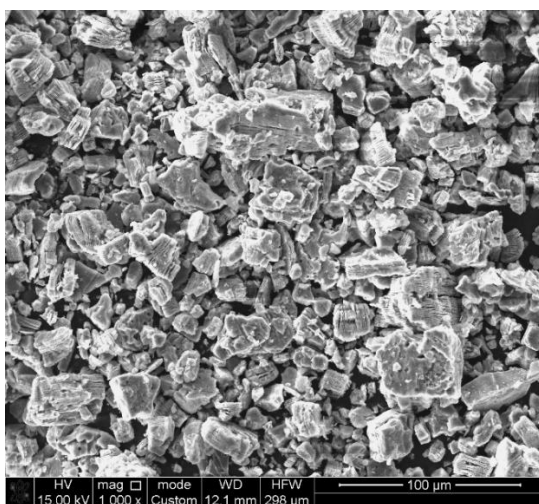


c

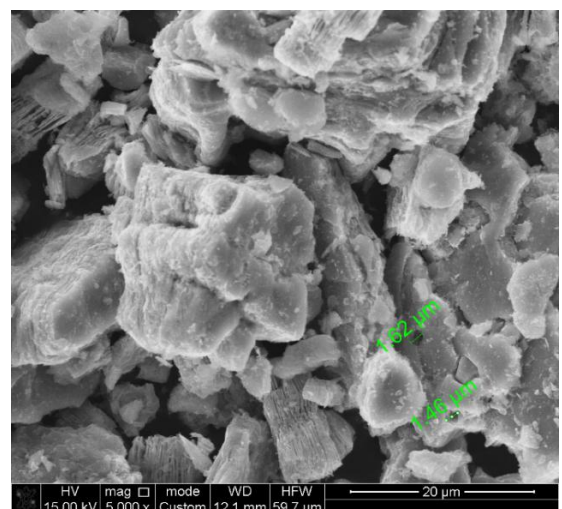
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	9.47	25.03
<i>OK</i>	3.79	7.51
<i>AlK</i>	19.45	22.87
<i>TiK</i>	67.29	44.59
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

d

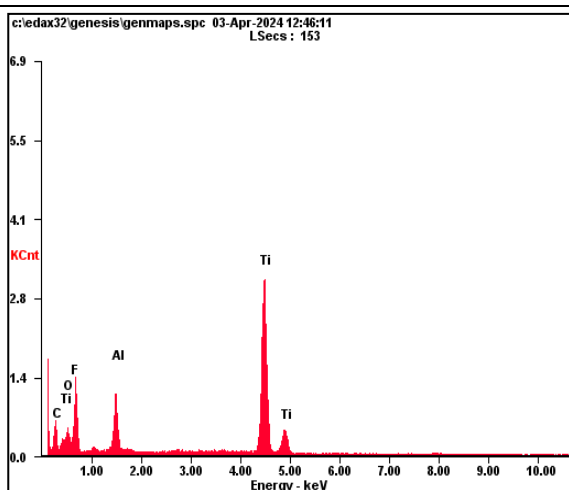
Рисунок 3. Ti_3AlC_2 (MAX) и СЭМ-микрофотографии: а - микроструктура поверхностного слоя; б - структура центральной части сечения образца; с - композита на основе Ti_3AlC_2 ; д - спектры элементный расчет ЕДХ



a



b



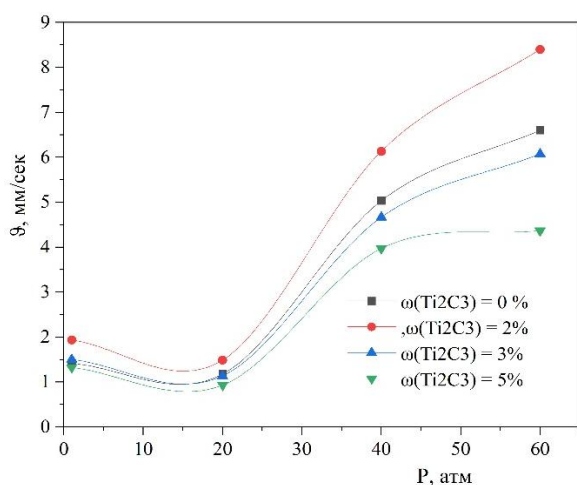
Element	Wt%	At%
CK	12.27	25.50
OK	9.31	14.54
FK	20.72	27.23
AlK	6.55	6.06
TiK	51.15	26.67
Matrix	Correction	ZAF

c

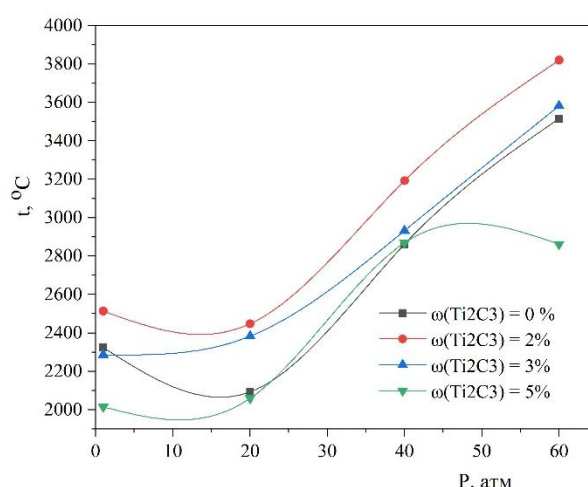
d

Рисунок 4. Ti_3AlC_2 (MAX) и СЭМ-микрофотографии: а -микроструктура поверхностного слоя; б - структура центральной части сечения образца; с - композита на основе Ti_3AlC_2 ; d - спектры элементный расчет ЕДХ

Скорость горения твердого ракетного топлива варьируется в зависимости от различных факторов. Были проведены работы по изучению влияния катализатора на горение в образце без добавления катализатора к топливу, обладающему одинаковыми свойствами, и с добавлением катализатора Ti_3C_2 (MXene) с массовым содержанием 2, 3, 5%. Когда образцы горели в диапазоне давления в камере сгорания от 1 до 60 атм, было обнаружено, что образец с массовой долей Ti_3C_2 (MXene) 2% хорошо горит. Особенно среди диапазонов 40-60 было обнаружено, что все виды топлива имеют высокую скорость горения, хотя наблюдалось интенсивное увеличение скорости горения образцов с 2% катализатором. На рисунке 6а показано влияние давления и количества катализатора на скорость горения. Хотя увеличение количества катализатора Максина положительно не влияет на скорость горения, расширение поверхности горения за счет увеличения давления может увеличить скорость горения. Принимая во внимание результаты, можно сказать, что процент катализатора, который был наиболее эффективным, составляет 2%. Как показано на рисунке 5а, было обнаружено, что при увеличении давления скорость горения увеличивается из-за увеличения поверхности горения.



a



b

Рисунок 5. Влияние давления на скорость горения и тепловыделение

Повышенный уровень энергии твердого ракетного топлива увеличивает давление и температуру в камере сгорания ракетного двигателя. За счет повышения давления и температуры твердого топлива увеличивается скорость его сгорания и улучшаются условия работы ракетного двигателя. Как показано на рисунке 5б, повышение уровня энергии твердого топлива неуклонно увеличивалось между диапазонами давления 40-60. Исследование показало, что из образцов, полученных путем добавления различных процентных количеств катализатора (0-5% Ti_3C_2 (MXene)) в состав композитного твердого топлива ракеты, температура сгорания катализатора, составляющего 2%, повышается с 2514 °С до 3820 °С. Таким образом, наша работа измеряет не только скорость сгорания, но и энергию сгорания твердого топлива.

Заключение

Совершенствование твердотопливного ракетного топлива и оптимизация процесса горения, несомненно, увеличат переносную мощность наряду со скоростью ракетных двигателей. Есть много факторов, которые влияют на скорость сгорания твердого топлива, одним из которых является катализатор, поэтому катализатор является удобным подходом с большим потенциалом в совершенствовании ракетного двигателя. Подводя итоги этой работы, мы продолжим процесс замены традиционного катализатора из оксидов переходных металлов на наноразмерные катализаторы, которые мы использовали до сих пор, и остановимся на каталитическом значении наноразмерных частиц максина. Результаты эксперимента показали, что добавление Ti_3C_2 (MXene) к твердому топливу ракеты приводит к значительному увеличению скорости горения и более высокому удельному импульсу. Это связано с тем, что Ti_3C_2 (MXene) снижает температуру термического разложения перхлората аммония, предотвращая максимальное тепловыделение. Эти явления, наряду с увеличением скорости горения, увеличивают мощность ракетного двигателя. При усовершенствовании ракетных двигателей Ti_3C_2 (MXene) демонстрируют многообещающие свойства в качестве катализатора.

Благодарности:

Алипбаев Аманбол Наматжанович - обработал материал научной статьи в различных базах данных и информационных системах, выявил аналитическую и статистическую отчетность, которая повлияла на них в координатах химических показателей, средах разной концентрации. В том числе участник научного проекта «Разработка технологии получения нитридсодержащих СВС-композитов в установке высокого давления» и «СВ-синтез диборида магния в реакторе высокого давления и электрофизические свойства композитов на его основе».

Мансуров Зулхаир Аймухаметович – профессор, методы исследования и результаты научных работ предварительно были доложены и обсуждены на международных конференциях и только затем опубликованы в печати. Для обучения молодежи им организовано проведение в Казахстане конференций по нанотехнологиям.

Финансирование: отсутствует.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: концептуализация, анализ и написание теста –Мансуров З. А., сбор данных – Коркембай Ж.; корректировка и утверждение окончательного варианта статьи для публикации – Алипбаев А.Н. Все авторы рассмотрели и согласились с опубликованной версией рукописи.

Список литературы

1. Dennis C., Bojko B. On the combustion of heterogeneous AP/HTPB composite propellants: A review // *Fuel*. - 2019. - Vol. 254. - P. 115646. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115646>.
2. Usman M., Wang L., Yu H., Haq F., Haroon M., Summe Ullah R., Khan A., Fahad S., Nazir A., Elshaarani T. Recent progress on ferrocene-based burning rate catalysts for propellant applications // *Journal of Organometallic Chemistry*. - 2018. - Vol. 872. - P. 40–53. <https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2018.07.015>.
3. Beckstead M.W., Puduppakkam K., Thakre P., Yang V. Modeling of combustion and ignition of solid-propellant ingredients // *Progress in Energy and Combustion Science*. - 2007. - Vol. 33, № 6. - P. 497–551. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.02.003>.
4. Zhang D., Cao C.-Y., Lu S., Cheng Y., Zhang H.-P. Experimental insight into catalytic mechanism of transition metal oxide nanoparticles on combustion of 5-Amino-1H-Tetrazole energetic propellant by multi kinetics methods and TG-FTIR-MS analysis // *Fuel*. - 2019. - Vol. 245. - P. 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.02.007>.
5. Sippel T.R., Son S.F., Groven L.J. Aluminum agglomeration reduction in a composite propellant using tailored Al/PTFE particles // *Combustion and Flame*. - 2014. - Vol. 161, № 1. - P. 311–321. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.08.009>.
6. Carnes C.L., Klabunde K.J. The catalytic methanol synthesis over nanoparticle metal oxide catalysts // *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. - 2003. - Vol. 194, № 1–2. - P. 227–236. [https://doi.org/10.1016/S1381-1169\(02\)00525-3](https://doi.org/10.1016/S1381-1169(02)00525-3).
7. Eslami A., Hosseini S.G., Bazrgary M. Improvement of thermal decomposition properties of ammonium perchlorate particles using some polymer coating agents // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. - 2013. - Vol. 113, № 2. - P. 721–730. <https://doi.org/10.1007/s10973-012-2784-6>.
8. Chen L., Li L., Li G. Synthesis of CuO nanorods and their catalytic activity in the thermal decomposition of ammonium perchlorate // *Journal of Alloys and Compounds*. - 2008. - Vol. 464, № 1–2. - P. 532–536. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.10.058>.
9. Yu Z., Chen L., Lu L., Yang X., Wang X. DSC/TG-MS Study on in Situ Catalytic Thermal Decomposition of Ammonium Perchlorate over Co_2O_4 // *Chinese Journal of Catalysis*. - 2009. - Vol. 30, № 1. - P. 19–23. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(08\)60087-X](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(08)60087-X).
10. Ayoman E., Hosseini S.G. Synthesis of CuO nanopowders by high-energy ball-milling method and investigation of their catalytic activity on thermal decomposition of ammonium perchlorate particles // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. - 2016. - Vol. 123, № 2. - P. 1213–1224. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-5059-1>.
11. Zhang D., Lu S., Gong L.-L., Cao C.-Y., Zhang H.-P. Effects of calcium carbonate on thermal characteristics, reaction kinetics and combustion behaviors of 5AT/Sr(NO₃)₂ propellant // *Energy Conversion and Management*. - 2016. - Vol. 109. - P. 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.11.051>.
12. Sutton G.P., Biblarz O. Rocket propulsion elements. - 7th ed. John Wiley & Sons; 612 2001. - p. 419–434.
13. Korkembay Zh., Toshtay K., Atamanov M., Malchik F., Amrousse R., Merkiybayev Y., Imash A., Mansurov Z. Determination of the Catalytic Activity of the MXene in the Combustion of Ammonium Perchlorate // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. - 2024. - Vol. 97, № 4. - P. 985–992. <https://doi.org/10.1007/s10891-024-02968-1>.
14. Yaman H., Çelik V., Değirmenci E. Experimental investigation of the factors affecting the burning rate of solid rocket propellants // *Fuel*. - 2014. - Vol. 115. - P. 794–803. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.033>.
15. Chen Y., Fan Z., Zhang Z., Niu W., Li C., Yang N., Chen B., Zhang H. Two-Dimensional Metal Nanomaterials: Synthesis, Properties, and Applications // *Chemical Reviews*. - 2018. - Vol. 118, № 13. - P. 6409–6455. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00727>.

16. Dillon A.D., Ghidui M.J., Krick A.L., Griggs J., May S.J., Gogotsi Y., Barsoum M.W., Fafarman A.T. Highly Conductive Optical Quality Solution-Processed Films of 2D Titanium Carbide // *Advanced Functional Materials*. - 2016. - Vol. 26, № 23. - P. 4162–4168. <https://doi.org/10.1002/adfm.201600357>.

17. Chirica I.M., Mirea A.G., Neațu Ș., Florea M., Barsoum M.W., Neațu F. Applications of MAX phases and MXenes as catalysts // *Journal of Materials Chemistry A*. - 2021. - Vol. 9, № 35. - P. 19589–19612. <https://doi.org/10.1039/D1TA04097A>.

Ж. Көркембай^{1*}, А.Н. Алипбаев², З.А. Мансуров³

^{1,3}Ал-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

²Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан

¹С.Д. Асфендияров атындағы Қазақ ұлттық медицина университеті, Алматы, Қазақстан

Ti₃C₂ (MXene) катализатор қатысында аммоний перхлораты негізіндегі қатты отынның жану үрдіс

Аңдатпа. Қатты отындырдың ғарыштық тасымал саладағы қажеттілігін ескерсек, оларды дамыту, жетілдіре түсу аса маңызға ие екенін түсінеміз. Қолданыстағы қатты отындарға пайдаланылатын катализаторлардың каталитикалық белсенділігін жақсарту арқылы жағымсыз жану өнімділігінен болатын зардаптарды азайтуға болады. Ерекше құрлымға ие, екі өлшемді өтпелі металл карбидтерінің Ti₃C₂ (MXene) каталитикалық қасиеттері үлкен қызығушылықтар тудыруда. Бұл жұмыста біз максиннің Ti₃C₂(MXene) аммоний перхлораты негізіндегі композициялық қатты отынның жануына каталитикалық әсерін қарастырдық. Үлгілер жоғары қысымды құрылғыда, әр түрлі аргон қысымында жандырылды. Жану барысы жоғары жылдамдықты бейнекамераға түсірілді және температурасы пирометрдің көмегімен өлшенді. Анықталған параметрлер бойынша құрылған графикті талдағанда, максин Ti₃C₂ (MXene) қосылған аммоний перхлораты негізіндегі қатты отын жанғанда масса мен жылу алмасудың жақсарғаны байқалады.

Түйін сөздер: Ti₃C₂ (MXene) нано ұнтақтары, аммоний перхлораты (ПА), каталитикалық белсенділік, кинетикалық параметрлер, қатты отын

Zh. Korkembay^{1*}, A.N. Alipbayev², Z.A. Mansurov³

^{1,3}Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

²Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan

¹Kazakh National Medical University named after S. D. Asfendiyarov, Almaty, Kazakhstan

Combustion process in the presence of Ti₃C₂ (MXene) solid fuel catalyst based on ammonium perchlorate

Annotation. Given the need for space materials in solid fuels, their development, the improvement of fuel materials is of great importance. By improving the catalytic activity of the catalysts used in existing solid fuels, it is possible to reduce the effects caused by adverse combustion characteristics. Gorenje The catalytic properties of Ti₃C₂ (MXene) two-dimensional transition metal carbides with a special structure are of great interest. In this paper, we examined the catalytic effect of maxene Ti₃C₂ (MXene) on the combustion of a composite solid fuel based on ammonium perchlorate. The samples were ignited in a high-pressure device, at various argon pressures. was filmed on a high-speed video camera, and the temperature was measured using a pyrometer. When analyzing the graph based on the obtained parameter values, an improvement in mass and heat transfer is observed during the combustion of solid fuels based on ammonium perchlorate with the addition of the Ti₃C₂ (MXene).

Keywords: Ti₃C₂ (MXene) Ammonium perchlorate (AP) nanopowders. Catalytic activity. Kinetic parameters. Solid fuel.

References

1. Dennis C., Bojko B. On the combustion of heterogeneous AP/HTPB composite propellants: A review // *Fuel*. - 2019. - Vol. 254. - P. 115646. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115646>.
2. Usman M., Wang L., Yu H., Haq F., Haroon M., Summe Ullah R., Khan A., Fahad S., Nazir A., Elshaarani T. Recent progress on ferrocene-based burning rate catalysts for propellant applications // *Journal of Organometallic Chemistry*. - 2018. - Vol. 872. - P. 40–53. <https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2018.07.015>.
3. Beckstead M.W., Puduppakkam K., Thakre P., Yang V. Modeling of combustion and ignition of solid-propellant ingredients // *Progress in Energy and Combustion Science*. - 2007. - Vol. 33, № 6. - P. 497–551. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.02.003>.
4. Zhang D., Cao C.-Y., Lu S., Cheng Y., Zhang H.-P. Experimental insight into catalytic mechanism of transition metal oxide nanoparticles on combustion of 5-Amino-1H-Tetrazole energetic propellant by multi kinetics methods and TG-FTIR-MS analysis // *Fuel*. - 2019. - Vol. 245. - P. 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.02.007>.
5. Sippel T.R., Son S.F., Groven L.J. Aluminum agglomeration reduction in a composite propellant using tailored Al/PTFE particles // *Combustion and Flame*. - 2014. - Vol. 161, № 1. - P. 311–321. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.08.009>.
6. Carnes C.L., Klabunde K.J. The catalytic methanol synthesis over nanoparticle metal oxide catalysts // *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. - 2003. - Vol. 194, № 1–2. - P. 227–236. [https://doi.org/10.1016/S1381-1169\(02\)00525-3](https://doi.org/10.1016/S1381-1169(02)00525-3).
7. Eslami A., Hosseini S.G., Bazrgary M. Improvement of thermal decomposition properties of ammonium perchlorate particles using some polymer coating agents // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. - 2013. - Vol. 113, № 2. - P. 721–730. <https://doi.org/10.1007/s10973-012-2784-6>.
8. Chen L., Li L., Li G. Synthesis of CuO nanorods and their catalytic activity in the thermal decomposition of ammonium perchlorate // *Journal of Alloys and Compounds*. - 2008. - Vol. 464, № 1–2. - P. 532–536. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.10.058>.
9. Yu Z., Chen L., Lu L., Yang X., Wang X. DSC/TG-MS Study on in Situ Catalytic Thermal Decomposition of Ammonium Perchlorate over Co_2O_4 // *Chinese Journal of Catalysis*. - 2009. - Vol. 30, № 1. - P. 19–23. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(08\)60087-X](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(08)60087-X).
10. Ayoman E., Hosseini S.G. Synthesis of CuO nanopowders by high-energy ball-milling method and investigation of their catalytic activity on thermal decomposition of ammonium perchlorate particles // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. - 2016. - Vol. 123, № 2. - P. 1213–1224. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-5059-1>.
11. Zhang D., Lu S., Gong L.-L., Cao C.-Y., Zhang H.-P. Effects of calcium carbonate on thermal characteristics, reaction kinetics and combustion behaviors of 5AT/Sr(NO₃)₂ propellant // *Energy Conversion and Management*. - 2016. - Vol. 109. - P. 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.11.051>.
12. Sutton GP, Biblarz O. Rocket propulsion elements. - 7th ed. John Wiley & Sons; 612 2001. - p. 419–434.
13. Korkembay Zh., Toshtay K., Atamanov M., Malchik F., Amrousse R., Merkiybayev Y., Imash A., Mansurov Z. Determination of the Catalytic Activity of the MXene in the Combustion of Ammonium Perchlorate // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. - 2024. - Vol. 97, № 4. - P. 985–992. <https://doi.org/10.1007/s10891-024-02968-1>.
14. Yaman H., Çelik V., Değirmenci E. Experimental investigation of the factors affecting the burning rate of solid rocket propellants // *Fuel*. - 2014. - Vol. 115. - P. 794–803. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.033>.
15. Chen Y., Fan Z., Zhang Z., Niu W., Li C., Yang N., Chen B., Zhang H. Two-Dimensional Metal Nanomaterials: Synthesis, Properties, and Applications // *Chemical Reviews*. - 2018. - Vol. 118, № 13. - P. 6409–6455. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00727>.

16. Dillon A.D., Ghidui M.J., Krick A.L., Griggs J., May S.J., Gogotsi Y., Barsoum M.W., Fafarman A.T. Highly Conductive Optical Quality Solution-Processed Films of 2D Titanium Carbide // *Advanced Functional Materials*. - 2016. - Vol. 26, № 23. - P. 4162–4168. <https://doi.org/10.1002/adfm.201600357>.

17. Chirica I.M., Mirea A.G., Neațu Ș., Florea M., Barsoum M.W., Neațu F. Applications of MAX phases and MXenes as catalysts // *Journal of Materials Chemistry A*. - 2021. - Vol. 9, № 35. - P. 19589–19612. <https://doi.org/10.1039/D1TA04097A>.

Сведения об авторах

Коркембай Жанибек - автор для корреспонденции, докторант кафедры химической технологии и материаловедения, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, преподаватель кафедры химии, Казахский национальный медицинский университет им. С.Д. Асфендиярова, ул. *Толле би, 94*, 050012, Алматы, Казахстан.

ORCID : [https:// orcid.org/ 0000-0002-2954-3995](https://orcid.org/0000-0002-2954-3995)

Алипбаев Аманбол Наматжанович - доктор PhD, старший преподаватель кафедры химии, химической технологии и экологии, Алматинский технологический университет, ул. *Толле би, 100*, 050012, Алматы, Казахстан.

ORCID ID: 0000-0001-5301-4156

Мансуров Зулхаир Аймухаметович - доктор физических и химических наук, профессор кафедры химической технологии и материаловедения, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, 050040, Алматы, Казахстан.

ORCID: [https:// orcid.org / 0000-0002-8956-216X](https://orcid.org/0000-0002-8956-216X)

Korkembay Zhanibek – correspondence author, doctoral student of the Department of Chemical Technology and Materials Science, Al-Farabi Kazakh National University, lecturer at the Department of Chemistry S.D. Asfendiyarov Kazakh National Medical University, 94 Tole bi street, 050012, Almaty, Kazakhstan.

ORCID : [https:// orcid.org / 0000-0002-2954-3995](https://orcid.org/0000-0002-2954-3995)

Alipbayev Amanbol Namatzhanovich - senior Lecturer at the Department of Chemistry, Chemical Technology and Ecology, PhD, Almaty Technological University, 100 Tole bi street, 050012, Almaty, Kazakhstan.

ORCID ID: 0000-0001-5301-4156

Mansurov, Zulkhair Aimukhametovich - Professor of the Department of Chemical Technology and Materials Science of Al-Farabi Kazakh National University, Doctor of Physical and Chemical Sciences, 71 Al-Farabi Ave., 050040, Almaty, Kazakhstan.

ORCID: [https:// orcid.org / 0000-0002-8956-216X](https://orcid.org/0000-0002-8956-216X)



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).