

DEVELOPMENT OF COMPOSITE ALUMINUM POWDERS WITH ENHANCED THERMOREACTIVITY FOR ENERGETIC SYSTEMS

A.S. Khairullina^{1,2}, A.B. Artykbayeva^{1,2*}, A.E. Bakkara^{1,2}, B.S. Sadykov¹,
A. O. Zhapekova^{1,3}, I. B. Zhussupova², V. S. Aksenov^{4,5}

¹Institute of Combustion Problems, Almaty, Kazakhstan

²Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

³Kazakh National Women's Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan

⁴National Research Nuclear University "MEPhI" (Moscow Engineering Physics Institute),
Moscow, Russia

⁵N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

*E-mail: aidartykbayeva@gmail.com

Abstract: *Introduction.* In contemporary composite solid propellants, aluminum serves as a key energetic constituent; however, a passivating Al₂O₃ film on the particle surface markedly diminishes its effective reactivity. *The present study aims* to enhance the reaction performance of aluminum powder through mechanochemical treatment (MCT) employing functional modifiers. Commercial ASD-grade aluminum powder and GL-1 graphite were selected as the starting materials. *Results and discussion.* Within the experimental program, the aluminum powder was subjected to MCT with varying graphite loadings. The treatment dramatically increased the fraction of active aluminum owing to partial disruption of the oxide shell. Morphological examinations confirmed oxide removal, uniform graphite coating, and the emergence of lamellar structures measuring 20-80 nm. Thermal analysis further revealed a shift of the principal exothermic peak from 662.6 °C to 653.9 °C for the Al + 10% graphite composite, accompanied by a 27 % rise in heat release, indicative of a lower activation energy and more complete oxidation. Conversely, a 20% graphite addition reduced the thermal gain, as excess carbon shielded metallic sites. *Conclusion.* The graphite content of 10% is deemed optimal, providing the most favorable thermochemical behavior. The obtained results confirm that MCT of aluminum powder with graphite is an effective strategy for substantially increasing its reaction capability.

Key words: modifier, aluminum, graphite, mechanochemical treatment, thermogravimetric analysis, differential thermal analysis

Khairullina Ainur Serikkyzy

1st year PhD student, Junior Researcher;

E-mail: H_ainura_98@mail.ru

Artykbayeva Aida Baktykyzy

3rd year PhD student, Junior Researcher;

E-mail: aidartykbayeva@gmail.com

Bakkara Ayagoz Esenbaykyzy

Ass.professor, Leading Researcher;

E-mail: bakkara_ayagoz@mail.ru

Citation: Khairullina A.S., Artykbayeva A.B., Bakkara A.E., Sadykov B.S., Zhapekova A.O., Zhussupova I.B., Aksenov V.S. Development of composite aluminum powders with enhanced thermoreactivity for energetic systems. *Chem. J. Kaz.*, **2025**, 3(91), 63-73. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51580/2025-3.2710-1185.35>

<i>Sadykov Bakhtiyar Seisembekovich</i>	<i>PhD, Leading Researcher; E-mail: sadykoff.baha89@gmail.com</i>
<i>Zhapekova Anar Orazgaliyevna</i>	<i>PhD, Leading Researcher; E-mail: anarazhapekova83@gmail.com</i>
<i>Zhussupova Inzhumarzhan</i>	<i>4th year bachelor's student; E-mail: inzhuka.zhusupova@mail.ru</i>
<i>Aksenov Viktor Serafimovich</i>	<i>Candidate of Physical and Mathematical Sciences; E-mail: v.aksenov@mail.ru</i>

РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ПОРОШКОВ С ПОВЫШЕННОЙ ТЕРМОРЕАКТИВНОСТЬЮ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.С.Хайруллина^{1,2}, А.Б. Артықбаева^{1,2}, А.Е. Баққара^{1,2}, Б.С. Садықов¹,
А. О. Жапекова^{1,3}, І. Б. Жусупова², В. С. Аксенов^{4,5}*

¹*Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан*

²*Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан*

³*Казахский национальный женский педагогический университет, ул. Гоголя 114, Алматы, Казахстан*

⁴*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

⁵*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия*

**E-mail: aidartykbayeva@gmail.com*

Резюме: *Введение.* В современном твердом ракетном топливе алюминий служит важным энергетическим компонентом, однако оксидная пленка на его частицах снижает эффективную реакционную способность. *Цель данной работы* - повысить реакционную способность алюминиевого порошка путём механохимической обработки с использованием модификаторов. В качестве материалов использованы порошок алюминия марки АСД и графит марки ГЛ-1. *Результаты и обсуждение.* В рамках эксперимента порошок алюминия подвергли механохимической обработке (МХО) с различными содержаниями графита. Показано, что МХО значительно увеличивает содержание активного алюминия в порошке за счет частичного разрушения оксидной пленки на его поверхности. Помимо этого, морфологические анализы подтверждают разрушение оксида, покрытие графитом и появление пластинчатых структур размером 20-80 нм. Термический анализ показывает, что основной экзотермический пик смещается с 662.6 °С до 653.9 °С для Al+10% графита и на 27 % увеличивается выделяемое тепло, что означает более низкую энергию активации и более полное окисление. Однако при 20 % графита тепловой прирост уменьшается, поскольку углерод экранирует металлические участки. *Заключение.* Оптимальным признано содержание 10% графита, при котором достигается наилучшее термохимическое поведение алюминиевого порошка. Полученные результаты подтверждают, что МХО алюминиевого порошка графитом является эффективным способом повышения его реакционной способности.

Ключевые слова: модификатор, алюминий, графит, механохимическая обработка, термогравиметрический анализ, дифференциальный термический анализ.

<i>Хайруллина Айнуր Серикқызы</i>	<i>докторант 1-го курса</i>
<i>Артықбаева Аида Бақытқызы</i>	<i>докторант 3-го курса</i>
<i>Баққара Аяғөз Есенбайқызы</i>	<i>PhD, ВНС Института проблем горения, ассоциированный профессор</i>
<i>Садықов Бахтияр Сейсембекович</i>	<i>PhD, ВНС Института проблем горения</i>
<i>Жапекова Анар Оразгалиевна</i>	<i>PhD, ВНС Института проблем горения</i>
<i>Жусупова Инжумаржан Бахбергенқызы</i>	<i>бакалавриат 4-го курса</i>
<i>Аксенов Виктор Серафимович</i>	<i>кандидат физико-математических наук</i>

1. Введение

Алюминий (Al) широко используется в качестве металлического горючего в композиционных твёрдых топливах [1] благодаря высокой массовой теплоте окисления, значительной плотности и коррозионной стойкости [1-4]. Включение алюминиевого порошка в твердоракетные топлива (ТРТ) повышает энергетическую плотность заряда и термодинамический потенциал системы [5-7]. Однако эксплуатационная реализация указанных преимуществ ограничена рядом факторов: пассивирующая плёнка Al_2O_3 увеличивает индукционный период воспламенения, расплавленные частицы склонны к коалесценции и формированию крупнодисперсных агломератов, неполное окисление металла приводит к накоплению твёрдого остатка, ухудшая теплоперенос в реакционной зоне. Для минимизации перечисленных явлений требуются целенаправленные методы поверхностной модификации, обеспечивающие высокую реакционную способность алюминия при сохранении технологической надёжности порошка [8].

Одним из эффективных подходов является введение графита в качестве твёрдого функционального модификатора. Благодаря высокой теплопроводности и химической инертности графит интенсифицирует теплообмен между зоной экзотермической реакции и алюминиевыми частицами, ускоряя прогрев и разрушение оксидной оболочки [4]. Дополнительно модификатор-графит выполняют роль механического разделителя, что уменьшает средний диаметр формирующихся агломератов и повышает полноту окисления металла.

Получение модифицированных частиц реализуется посредством механохимической активации, ультразвукового диспергирования, химического осаждения и их комбинаций. Механохимическая обработка уменьшает размер частиц, внедряет модификатор в поверхностный слой и повышает дефектность кристаллической решётки, ускоряя диффузию кислорода через оксидную плёнку [9].

Комплексная модификация алюминия графитом позволяет сократить индукционный период воспламенения, увеличить скорость горения и снизить выход твёрдых конденсированных продуктов, тем самым повышая термохимическую эффективность твёрдого топлива. Настоящая работа направлена на систематическое исследование влияния указанных добавок на тепловые и кинетические параметры окисления алюминия в условиях, имитирующих эксплуатационные нагрузки, и могут быть использованы при разработке новых типов ракетных топлив, обеспечивая высокую эффективность работы двигателей и снижению технологических потерь.

2. Экспериментальная часть

В ходе исследования использовали алюминиевый порошок АСД содержащий 95.8% металлического алюминия. Средний размер частиц алюминия АСД составляет 30 мкм.

Модифицирующей добавкой служила графитовая пудра марки ГЛ-1 (ГОСТ 17022-81). Графит применён для подавления агломерации алюминиевых частиц и снижения тепловых потерь за счёт высокой теплопроводности и термохимической стабильности.

Процесс механохимической обработки (МХО) проводился с использованием планетарно-шаровой мельницы NXQM-2A. В эксперименте варьировалось введение модифицирующих добавок в пределах 10-20%, при этом МХО проводилась в течение 20 минут. Установленные технологические параметры включали скорость вращения 460 об/мин и массу порошка к массе шаров равную 1:4. Для предотвращения окисления частиц алюминия кислородом воздуха после проведения МХО, образцы пассивировались гексаном.

Микроструктурный анализ осуществляли с применением сканирующего электронного микроскопа JSM-6490 (JEOL, Япония). Рентгенофазовые исследования проводили на дифрактометре ДРОН-4М (Россия) с использованием монохроматического излучения $\text{CoK}\alpha$ ($\lambda = 0.17902$ нм) и $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 0.15418$ нм) в диапазоне $2\theta = 10-70^\circ$ при шаге 0.02° . Распределение частиц по размерам определяли на лазерном анализаторе дисперсности Winner 2005A (Jinan Winner, КНР). Термический анализ (ДТА и ТГ) выполняли на одновременном термоанализаторе STA 409 PC/PG (NETZSCH, Германия).

3. Результаты и обсуждение

Результаты энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) показывают, что исследуемый порошок обладает высокой химической чистотой: массовая доля алюминия составляет 98.27%. Это соответствует техническим характеристикам порошков марки АСД, которые обычно содержат не менее 99.7% Al и лишь около 0.3% суммарных примесей [10].

По результатам вольюметрического анализа установлено, что механохимическая обработка алюминия повышает содержание активного металла с 80.52% до 92.90% за счёт разрушения пассивной оксидной плёнки и активации поверхности частиц. Это способствует улучшению воспламеняемости и реакционной способности алюминия в составе твёрдого ракетного топлива. При добавлении графита (10-20% С) активность алюминия снижается до 76.80% и 74.30% соответственно, что связано с разбавлением металлической фазы и частичным экранированием поверхности, ограничивающим доступ кислорода.

Результаты исследования модификации алюминиевых композитов с использованием механохимической обработки (МХО) и добавок, таких как графит, показали значительное влияние на физико-химические свойства материала. МХО разрушила исходную оксидную оболочку на поверхности Al (рисунок 1а), увеличив доступность металлической фазы и сформировав слоисто-пластинчатую морфологию с высокой удельной поверхностью, что ускоряет взаимодействие с окислителем.

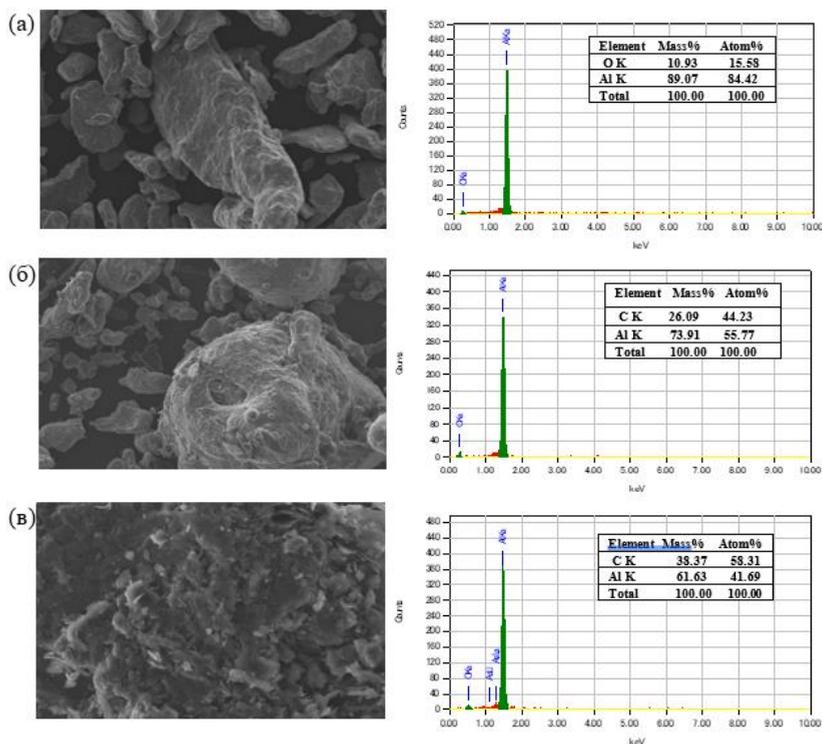


Рисунок 1 - Энергодисперсионный спектр и массовая доля элементов в составе образца ((a) Al АСД; (б) Al АСД+ 10%; (в) Al АСД+ 20% С) после 20 минут МХО.

Добавление 10% графита обеспечивает образование тонкого углеродного покрытия, предотвращая окисление и агломерацию частиц, одновременно повышая их традиционную способность для улучшения теплообмена и диспергирования (рисунок 1б). При содержании 20% графита наблюдается гетерогенная структура с агрегатами внутри и более устойчивой композицией, обеспечивающей термическую стабильность, но снижающую климатический эффект (рисунок 1в).

В исходном образце Al АСД (рисунок 2а) фиксируются резкие интенсивные дифракционные пики Al, свидетельствующие о высокой степени кристалличности. После МХО (рисунок 2б) наблюдается расширение и уменьшение распространения пиков, что свидетельствует об уменьшении размера кристаллитов и возрастании микродеформаций кристаллической решётки. Наибольшее снижение ограничения фиксируется при 20% графита (рисунок 2г), что отражает дальнейшее измельчение кристаллитов и рост дефектности структуры. При этом отсутствует линия Al_4C_3 , а Al остается аналитической кристаллической фазой, а углерод находится в аморфном или тонкодисперсном состоянии (рисунок 2в-г).

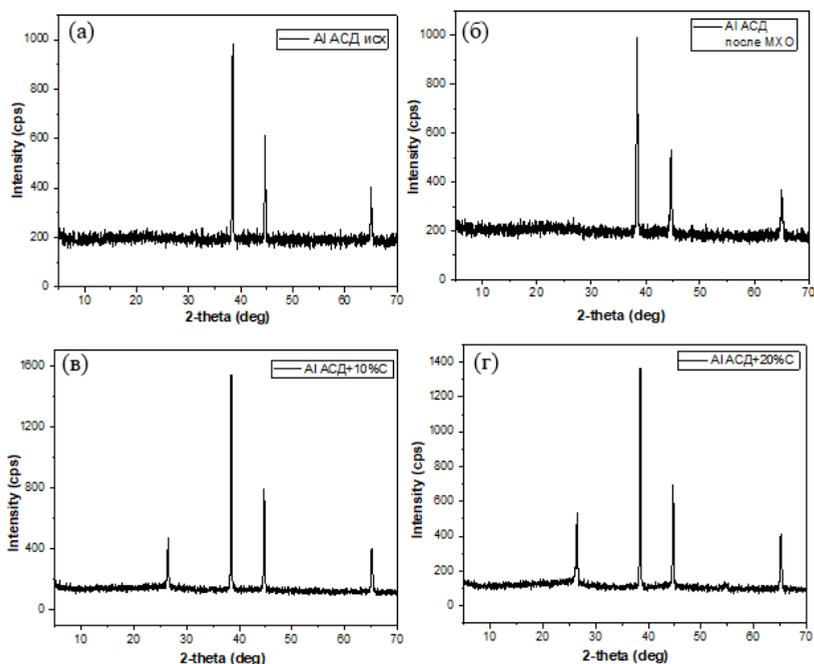
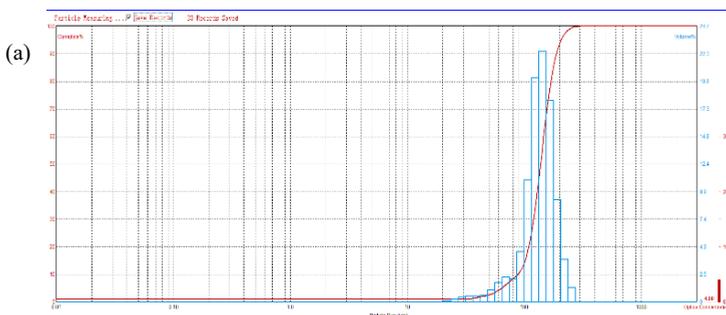


Рисунок 2 - Дифрактограмма образцов: (а) Al ASD исходный; ((б) Al ASD; (B) Al ASD+10% C; (г) Al ASD+20% C) после 20 минут MXO

После MXO алюминия (рисунок 3а) основной диапазон размеров составляет 50-150 нм, что указывает на высокую степень дробления и однородность. При добавлении 10% графита (рисунок 3б) максимум распределения смещается в область 30-100 нм, а доля ультрадисперсной фракции увеличивается. Такой эффект связан с диспергирующей ролью графита, который снижает агломерацию и улучшает передачу энергии. При содержании 20% графита (рисунок 3в) размеры частиц снижаются до 20-80 нм, а распределение становится более равномерным. Незначительное расширение диапазона объясняется сочетанием усиленной фрагментации и формированием вторичных агрегатов.



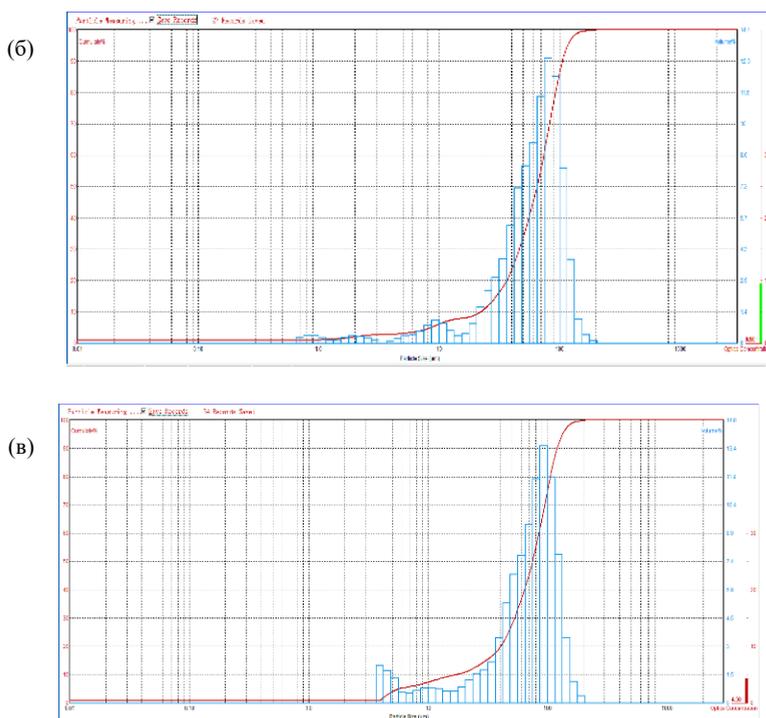


Рисунок 3 - Распределение частиц: ((а) Al АСД; (б) Al АСД +10% С; (в) Al АСД +20% С) после 20 мин МХО.

Результаты термогравиметрического (ТГ) и дифференциального термического анализа (ДТА), представленные на рисунке 4, демонстрируют существенные различия в термическом поведении исходного и модифицированных алюминиевых порошков. Для Al АСД (рисунок 4а) характерна широкая экзотермическая область с пиками при 662.6°C и 681.1°C , сопровождаемая низким тепловыделением из-за плотной оксидной оболочки. После МХО (рисунок 4б) пики смещаются в область более низких температур (655.0°C и 672.6°C), что указывает на рост реакционной способности алюминия. Наиболее выраженный термический отклик наблюдается у образца с 10% графита (рисунок 4в), где основной пик фиксируется при 653.9°C , а тепловыделение возрастает, что связано с улучшением теплообмена и стабилизацией реакционной поверхности. Введение 20% графита (рисунок 4г) приводит к снижению интенсивности и частичному экранированию металлической фазы углеродом, что ограничивает доступ кислорода и уменьшает тепловой эффект.

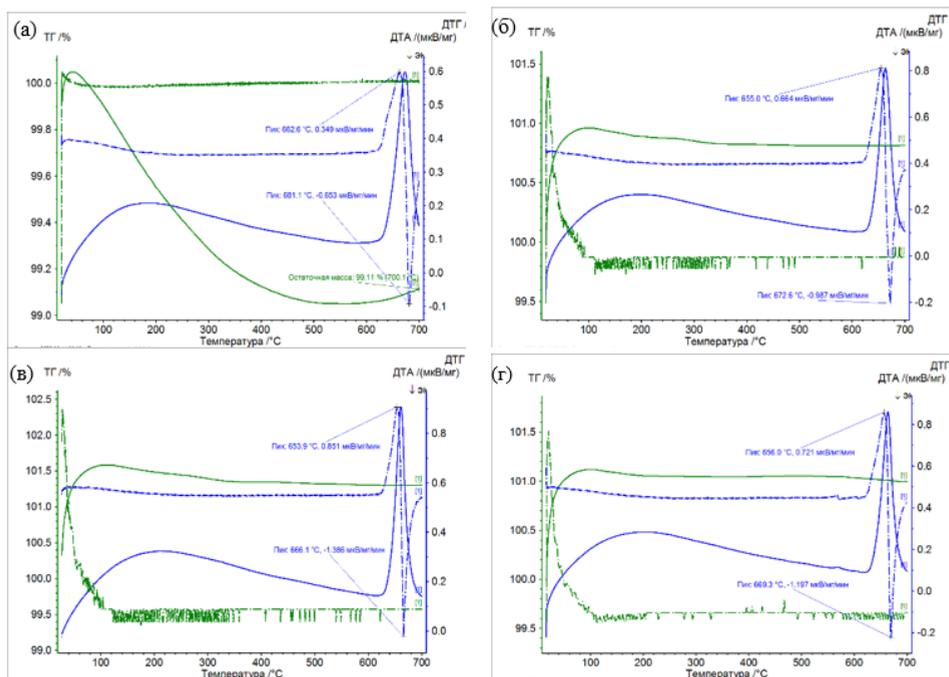


Рисунок 4 - Термический анализ композитов: (а) Al АСД исходный; ((б) Al АСД; (в) Al АСД+10% С; (г) Al АСД+20% С) после 20 минут МХО

Таким образом, уменьшение размера частиц приводит к увеличению удельной поверхности и снижению тепловой инерции, что ускоряет прогрев и разрушение оксидной плёнки.

4. Заключение

В результате проведённого исследования были определены оптимальные условия механохимической активации алюминия с добавлением графита, позволяющие существенно улучшить его терморреакционные характеристики для применения в составе твёрдых ракетных топлив. Установлено, что МХО разрушает оксидную плёнку и увеличивает долю активного алюминия (с 80.52 до 92.90%), а также смещает основной экзотермический пик окисления с 662.6 до 653.9°C, что способствует ускоренному воспламенению. Выявлено, что добавление 10% С обеспечивает оптимальное диспергирование частиц, повышение теплопроводности и подавление агломерации, при этом уменьшается средний размер кристаллитов Al и формируется равномерный углеродный слой, что, согласно данным ТГ/ДТА, приводит к более полному сгоранию и повышению энергетической эффективности топлива. При содержании 20 % С доля активного Al снижается до 74.30%, сохраняется углеродная защитная плёнка, однако возникает структурная гетерогенность и снижается

энтальпия реакции, что связано с разбавлением активной фазы и экранированием алюминиевых участков. Таким образом, разработан подход, при котором введение графита в оптимальном содержании позволяет одновременно стабилизировать структуру и активировать алюминий, обеспечивая более полное сгорание и повышение эффективности твёрдого топлива.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по проекту грантового финансирования AP19680387 - «Механохимический синтез высокоэнергоемких порошков на основе алюминия для улучшения военно-космических технологий».

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов между авторами, требующего раскрытия в данной статье.

ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРГЕ АРНАЛҒАН ТЕРМОРЕАКТИВТІЛІГІ ЖОҒАРЫ КОМПОЗИЦИЯЛЫҚ АЛЮМИНИЙ ҰНТАҚТАРЫН ӘЗІРЛЕУ

А.С.Хайруллина^{1,2}, А.Б. Артықбаева^{1,2}, А.Е. Баққара^{1,2}, Б.С. Садықов¹,
А. О. Жапекова^{1,3}, І. Б. Жусупова², В. С. Аксенов^{4,5}*

¹Жану Проблемалары Институты, Алматы, Қазақстан

²Әл-Фараби атындағы қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан

³Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан

⁴«МИФИ» Ұлттық зерттеу ядролық университеті, Мәскеу, Ресей

⁵Н. Н. Семёнов атындағы Ресей ғылым академиясының Химиялық физика жөніндегі федералдық зерттеу орталығы, Мәскеу, Ресей

*E-mail: aidartykbaeva@gmail.com

Түйіндемe: *Кіріспе.* Қазіргі қатты отындарда алюминий негізгі энергетикалық компонент ретінде әрекет етеді, алайда бөлшектер бетіндегі пассивтендіруші Al_2O_3 қабықшасы оның тиімді реакциялық қабілетін едәуір төмендетеді. *Зерттеудің мақсаты* - функционалдық модификатор ретінде графитті пайдалана отырып, алюминий ұнтағының реакциялық қасиеттерін механохимиялық өңдеу (МХӨ) арқылы арттыру. Бастапқы материалдар ретінде АСД маркалы алюминий ұнтағы және ГЛ-1 маркалы графит таңдалды. *Нәтижелер мен талқылау.* Тәжірибе барысында алюминий ұнтағы графиттің әртүрлі массалық үлестерімен МХӨ-ге ұшыратылды. Өңдеу нәтижесінде оксидтік қабықшаның ішінара бұзылуына байланысты белсенді алюминийдің үлесі айтарлықтай артты. Морфологиялық талдаулар оксидтің жойылуын, бөлшектердің біртекті графиттік жабындымен қапталуын және 20-80 нм өлшемді қабыршақ тәрізді құрылымдардың түзілуін растады. Термиялық талдау $Al+10\%$ графит композициясы үшін негізгі экзотермиялық шыңның 662.6 °C-тан 653.9 °C-қа ығысуын және жылудың бөлінуінің 27% -ға өсуін көрсетті, бұл активтіліктің төмендеуі мен тотығудың толығырақ жүруін білдіреді. Алайда, 20% графит қосқанда жылудың эффекттің азаюы байқалды, себебі артық көміртек металл беттерін экрандады. *Қорытынды.* Графиттің 10% үлесі оңтайлы деп танылды, өйткені дәл осы қатынас ұнтақтың ең қолайлы термохимиялық қасиеттерін қамтамасыз етеді. Алынған нәтижелер алюминий ұнтағын графитпен механохимиялық өңдеу оның реакциялық қабілетін арттырудың тиімді әдісі екенін растайды.

Түйін сөздер: модификатор, алюминий, графит, механохимиялық өңдеу, термогравиметриялық талдау, дифференциалды термиялық талдау

Хайруллина Айнура Серикқызы	2 курс докторанты
Артықбаева Аида Бақытқызы	3 курс докторанты
Баққара Аяғөз Есенбайқызы	PhD, Жану проблемалары институтының ЖФК қауымдастырылған профессор
Садықов Бахтияр Сейсембекович	PhD, Жану проблемалары институтының ЖФК
Жапқова Анар Оразғалиевна	PhD, Жану проблемалары институтының ЖФК
Жусупова Інжумаржан Бахбергенқызы	4 курс бакалавры
Аксенов Виктор Серафимович	физика-математика ғылымдарының кандидаты

Список литературы

1. Li H., Zhang J., Zhao F., Huang X. Aluminum combustion enhancement in AP free nitramine - based solid propellants by PVDF coating. *Fuel*. **2025**, 390, 134689. DOI: 10.1016/j.fuel.2025.134689.
2. Lu J., Chen C., Zhang B., Niu K., Xiao F., Liang T. Combustion and mechanical properties enhancement strategy based on stearic acid surface activated boron powders. *Sci. Rep.* **2024**, 14, No.1, 1-16. DOI: 10.1038/s41598-024-71246-0
3. Liang T., Xiao F., Li C., Seilkhan A., Aimbetova E., Aimbetova I. Improvement of energy density and thermodynamic properties of aluminum powder by assembling 5-aminotetrazole with high enthalpy on the surface layer of aluminum powder. *Adv. Compos. Hybrid Mater.* **2025**, 8, No.1, 78. DOI: 10.1007/s42114-024-01161-5
4. Streletskii A. N., Kolbanov I. V., Borunova A. B., Butyagin P. Y. Mechanochemically activated aluminium: Preparation, structure, and chemical properties. *J. Mater. Sci.* **2004**, 39, No.16, 5175–5179. DOI: 10.1023/B:JMISC.0000039205.46608.1a
5. Li-Qun X., Xue-Zhong F., Ji-Zhen L., Zhao Q., Xiao-Long F., Wei-Qiang P., Ying W. Effect of Al content and particle size on the combustion of HMX-CMDB propellant. *Combust. Flame.* **2020**, 214, 80–89. DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.12.022
6. Arezoo Z., Tres A.H., Don A.L., Silvia R., Bernard M.K., Christian P., and Luigi T.D. Mapping of Aluminum Particle Dispersion in Solid Rocket Fuel Formulations. *Springer Aerosp. Technol.* **2017**, 673–688. DOI: 10.1007/978-3-319-27748-6_27
7. Liu Y., Yang F., Zhang Y., Wu Z., Zhang Z. AlH₃ as High-Energy Fuels for Solid Propellants: Synthesis, Thermodynamics, Kinetics, and Stabilization. *Compounds.* **2024**, 4, No.2, 230-251. DOI: 10.3390/compounds4020012
8. Hu Q., Wang Z., Sun Z. Aluminum-based alloy fuels for solid propellants: Intrinsic properties, energy enhancement and combustion rate regulation. *J. Alloys Compd.* **2024**, 1010, No. April, 177793. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.177793
9. Bakkara A., Sadykov B., Artykbayeva A., Kamunur K., Batkal A., Kalmuratova B. Energy-Intensive Materials with Mechanically Activated Components. *ChemEngineering.* **2023**, 7, No.5, 1-15. DOI: 10.3390/chemengineering7050097
10. Shaitura N.S., Laricheva O.O., Larichev M. N. Studying the Mechanism of the Low Temperature Oxidation of Microsized Aluminum Powder by Water. *Russ. J. Phys. Chem. B.* **2019**, 13, No.2, 231-244. DOI: 10.1134/S1990793119020088

References

1. Li H., Zhang J., Zhao F., Huang X. Aluminum combustion enhancement in AP free nitramine - based solid propellants by PVDF coating. *Fuel*. **2025**, 390, 134689. DOI: 10.1016/j.fuel.2025.134689.
2. Lu J., Chen C., Zhang B., Niu K., Xiao F., Liang T. Combustion and mechanical properties enhancement strategy based on stearic acid surface activated boron powders. *Sci. Rep.* **2024**, 14, No.1, 1-16. DOI: 10.1038/s41598-024-71246-0
3. Liang T., Xiao F., Li C., Seilkhan A., Aimbetova E., Aimbetova I. Improvement of energy density and thermodynamic properties of aluminum powder by assembling 5-aminotetrazole with high enthalpy on the surface layer of aluminum powder. *Adv. Compos. Hybrid Mater.* **2025**, 8, No.1, 78. DOI: 10.1007/s42114-024-01161-5
4. Streletskii A. N., Kolbanov I. V., Borunova A. B., Butyagin P. Y. Mechanochemically activated aluminium: Preparation, structure, and chemical properties. *J. Mater. Sci.* **2004**, 39, No.16, 5175–5179. DOI: 10.1023/B:JMISC.0000039205.46608.1a

5. Li-Qun X., Xue-Zhong F., Ji-Zhen L., Zhao Q., Xiao-Long F., Wei-Qiang P., Ying W. Effect of Al content and particle size on the combustion of HMX-CMDB propellant. *Combust. Flame.* **2020**, *214*, 80–89. DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.12.022
6. Arezoo Z., Tres A.H., Don A.L., Silvia R., Bernard M.K., Christian P., and Luigi T.D. Mapping of Aluminum Particle Dispersion in Solid Rocket Fuel Formulations. *Springer Aerosp. Technol.* **2017**, *673–688*. DOI: 10.1007/978-3-319-27748-6_27
7. Liu Y., Yang F., Zhang Y., Wu Z., Zhang Z. AlH₃ as High-Energy Fuels for Solid Propellants: Synthesis, Thermodynamics, Kinetics, and Stabilization. *Compounds.* **2024**, *4*, No.2, 230-251. DOI: 10.3390/compounds4020012
8. Hu Q., Wang Z., Sun Z. Aluminum-based alloy fuels for solid propellants: Intrinsic properties, energy enhancement and combustion rate regulation. *J. Alloys Compd.* **2024**, *1010*, No. April, 177793. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.177793
9. Bakkara A., Sadykov B., Artykbayeva A., Kamunur K., Batkal A., Kalmuratova B. Energy-Intensive Materials with Mechanically Activated Components. *ChemEngineering.* **2023**, *7*, No.5, 1-15. DOI: 10.3390/chemengineering7050097
10. Shaitura N.S., Laricheva O.O., Larichev M. N. Studying the Mechanism of the Low Temperature Oxidation of Microsized Aluminum Powder by Water. *Russ. J. Phys. Chem. B.* **2019**, *13*, No.2, 231-244. DOI: 10.1134/S1990793119020088