

ПОИСК ЭФФЕКТИВНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГОРЮЧИХ И МЕТОДЫ ИХ АКТИВАЦИИ*

О. Г. Глотов¹

Аннотация: Представлен обзор литературы по методам активации горения металлических горючих (МГ) — Al и В — и их соединений в составе смесевых топлив. Рассмотрены основные пути и приемы, направленные на повышение полноты сгорания и реализацию теплотворной способности, а именно: использование комбинированных горючих и сплавов, механоактивации; нанесение функциональных покрытий на поверхность частиц МГ; создание композитных конгломератов (гранул); повышение дисперсности МГ; применение нетрадиционных окислителей и оптимальных связующих. Некоторые методы и идеи проверены экспериментально с использованием лабораторного подхода, разработанного для сравнения разнообразных МГ. В итоге представляется перспективным использование механоактивированного (МА) диборида алюминия, применение активирующих добавок в составе топлива, повышение массовой доли бора в топливе свыше 40% при условии обеспечения защиты частиц от взаимодействия с другими компонентами топлива и подавления агломерации.

Ключевые слова: бор; алюминий; магний; бориды; карбид бора; частицы; композиты; механоактивация; покрытия; горение; конденсированные продукты горения; полнота сгорания; эффективность энергосодержания

DOI: 10.30826/CE24170409

EDN: GXDCST

Литература

1. Талин Д. Д. Внутренняя баллистика ствольных систем и ракетных двигателей твердого топлива. — Пермь: Перм. гос. техн. ун-т., 2003. 165 с.
2. Тимнат И. Ракетные двигатели на химическом топливе / Пер. с англ. — М.: Мир, 1990. 294 с. (Timnat Y. M. Advanced chemical rocket propulsion. — London, Orlando: Academic Press, 1987. 286 p.)
3. Яновский Л. С., Лемперт Д. Б., Разносчиков В. В., Аверьков И. С., Шаров М. С. Оценка эффективности некоторых металлов и неметаллов в твердых топливах для ракетно-прямоточных двигателей // Физика горения и взрыва, 2020. Т. 56. № 1. С. 81–94.
4. Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В., Логачев В. С., Коротков А. И. Горение порошкообразных металлов в активных средах. — М.: Наука, 1972. 294 с.
5. Цуцуран В. И., Петрухин Н. В., Гусев С. А. Военно-технический анализ состояния и перспективы развития ракетных топлив. — М.: Министерство обороны РФ, 1999. 332 с.
6. Фролов Ю. В., Похил П. Ф., Логачев В. С. Воспламенение и горение порошкообразного алюминия в высокотемпературных газовых средах и составе гетерогенных конденсированных систем // Физика горения и взрыва, 1972. Т. 8. № 2. С. 213–236.
7. Гладун В. Д., Фролов Ю. В., Кашипов Л. Я. Агломерация частиц порошкообразного металла при горении смесевых конденсированных систем. — Черноголовка: Институт химической физики АН СССР, 1977. Препринт. 39 с.
8. Price E. W. Combustion of metalized propellants // Fundamentals of solid propellant combustion. — Progress in astronautics and aeronautics ser. — New York, NY, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1984. Vol. 90. P. 479–514.
9. DeLuca L. T., Paravan C., Reina A., Marchesi E., Maggi F., Bandera A., Colombo G., Kosowski B. M. Aggregation and incipient agglomeration in metallized solid propellants and solid fuels for rocket propulsion. AIAA Paper No. 2010-6752, 2010. 26 p.
10. Липанов А. М., Бобрышев В. П., Алиев А. В., Спиридонов Ф. Ф. Численный эксперимент в теории РДТТ. — Екатеринбург: Наука, 1994. 304 с.
11. Горбачев А. С., Лебедев А. С., Вагичев С. Н., Курбатов А. В. Влияние утолщенности сопла на осаждение конденсированной фазы в камере сгорания ракетного двигателя твердого топлива // Боеприпасы, 2023. № 2. С. 5–10.
12. Babuk V. A., Vassiliev V. A., Sviridov V. V. Propellant formulation factors and metal agglomeration in combustion of aluminized solid rocket propellant // Combust. Sci. Technol., 2001. Vol. 163. P. 261–289.

*Статья основана на докладе, представленном на 11-м Международном симпозиуме по неравновесным процессам, плазме, горению и атмосферным явлениям (NEPCAP), прошедшем в Сочи (Россия) в период с 7 по 11 октября 2024 г. Автор благодарит Министерство науки и высшего образования Российской Федерации за финансовую поддержку в рамках госзадания по теме FWGF-2021-0001.

¹Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук; Новосибирский государственный технический университет, glotov@kinetics.nsc.ru

13. Zarko V. E., Glotov O. G. Formation of Al oxide particles in combustion of aluminized condensed systems (review) // Sci. Technol. Energ. Ma., 2013. Vol. 74. No. 6. P. 139–143.
14. Korotkikh A. G., Glotov O. G., Arkhipov V. A., Zarko V. E., Kiskin A. B. Effect of iron and boron ultrafine powders on combustion of aluminized solid propellants // Combust. Flame, 2017. Vol. 178. P. 195–204.
15. Pang W. Q., DeLuca L. T., Fan X. Z., Glotov O. G., Wang K., Qin Z., Zhao F. Q. Combustion behavior of AP/HTPB/Al composite propellant containing hydroborate iron compound // Combust. Flame, 2020. Vol. 220. P. 157–167.
16. Krishnan S., George P. Solid fuel ramjet combustor design // Prog. Aerosp. Sci., 1988. Vol. 34. No. 3–4. P. 219–256.
17. Combustion of boron-based solid propellants and solid fuels / Eds. K. K. Kuo, R. Pein. — Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1993. 554 p.
18. Бакулин В. Н., Дубовкин Н. Ф., Котова В. Н., Сорокин В. А., Францевич В. П., Яновский Л. С. Энергоемкие горючие для авиационных и ракетных двигателей / Под ред. Л. С. Яновского. — М.: Физматлит, 2009. 400 с.
19. Сорокин В. А., Яновский Л. С., Козлов В. А., Суриков Е. В., Шаров М. С., Фельдман В. Д., Францевич В. П., Животов Н. П., Абашев В. М., Черваков В. В. Ракетно-прямоточные двигатели на твердых и пастообразных топливах. Основы проектирования и экспериментальной отработки / Под ред. А. А. Сорокина, Ю. М. Милёхина. — М.: Физматлит, 2010. 350 с.
20. Kuo K. K., Acharya R. Applications of turbulent and multiphase combustion. — Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012. 600 p.
21. Pang W., De Luca L. T., Fan X., Glotov O. G., Zhao F. Boron-based fuel-rich propellant: Properties, combustion, and technology aspects. — CRC Press, Taylor & Francis Group, an Informa Group Co., 2019. 323 p.
22. Glotov O. G. Screening of metal fuels for use in composite propellants for ramjets // Prog. Aerosp. Sci., 2023. Vol. 142. Art. 100954. 25 p. doi: 10.1016/j.paerosci.2023.100954.
23. Мееров Д. Б., Моногаров К. А., Брагин А. А., Фролов Ю. В., Пивкина А. Н., Шишов Н. И., Бестужева Т. А. Исследование процесса агломерации при горении борсодержащих составов // Горение и взрыв, 2015. Т. 8. № 2. С. 211–217.
24. Glotov O. G., Yagodnikov D. A., Kiskin A. B., Surodin G. S. Combustion characteristics of model composite propellants containing boron and its compounds // 8th European Conference for Aeronautics and Space Sciences Proceedings. — Madrid, 2019. 13 p. doi: 10.13009/EUCASS2019-260. <https://www.eucass.eu/index.php/component/docindexer/?task=download&id=5903>.
25. Yuan J., Liu J., Zhang L. Q., Xu P., Chen D., Yang W. Combustion and agglomeration characteristics of boron particles in boron-containing fuel-rich propellant // Combust. Flame, 2021. Vol. 232. P. 111551. doi: 10.1016/j.combustflame.2021.111551.
26. Glotov O. G., Poryazov V. A., Surodin G. S., Sorokin I. V., Krainov D. A. Combustion features of boron-based composite solid propellants // Acta Astronaut., 2023. Vol. 204. P. 11–24. doi: 10.1016/j.actaastro.2022.12.024.
27. Арефьев К. Ю., Воронецкий А. В., Прохоров А. Н., Яновский Л. С. Экспериментальное исследование полноты сгорания двухфазных продуктов газификации борсодержащих энергоемких конденсированных составов в высокоэнтальпийном воздушном потоке // Физика горения и взрыва, 2017. Т. 53. № 3. С. 42–52.
28. Федорычев А. В., Жестерева Д. В., Мишкин И. Р. Шлакование критического сечения сопла газогенератора ракетно-прямоточного двигателя // Горение и взрыв, 2020. Т. 13. № 2. С. 102–112. doi: 10.30826/СЕ20130211.
29. Гань А., Нетцер Д. У. Изучение горения металлизированных горючих для твердотопливных прямоточно-воздушных реактивных двигателей // Аэрокосмическая техника, 1987. Т. 4. № 4. С. 123–128.
30. Yan T., Liu P., Song N., Ou Y. Insight into combustion characteristics of micro- and nano-sized boron carbide // Combust. Flame, 2013. Vol. 251. Art. 112721. 12 p. doi: 10.1016/j.combustflame.2023.112721.
31. Huang X., Zhang M., Lin C., Yang Y., Li S., Li H., Yang Y., Qin Z., Zhao F. Comparison on ignition and combustion of AlMgB composite fuel and B fuel // Chem. Eng. J., 2022. Vol. 450. Part 2. Art. 138133. 15 p. doi: 10.1016/j.cej.2022.138133.
32. Nikitin P. Y., Zhukov I. A., Matveev A. E., Sokolov S. D., Boldin M. S., Vorozhtsov A. B. AlMgB₁₄–TiB₂ composite materials obtained by self-propagating high-temperature synthesis and spark plasma sintering // Ceram. Int., 2020. Vol. 46. No. 14. P. 1–5. doi: 10.1016/j.ceramint.2020.06.039.
33. Ponomarev V. I., Konovalikhin S. V., Kovalev I. D., Vershinin V. I., Borovinskaya I. P. Synthesis and crystal structure of [B₁₂]₂[CBC][C₂]Mg_{1.42}, a new modification of B₂₅C₄Mg_{1.42} // Mendeleev Commun., 2014. Vol. 24. P. 15–16. doi: 10.1016/j.mencom.2013.004.
34. Wang S., Schoenitz M., Dreizin E. L. Combustion of boron and boron-containing reactive composites in laminar and turbulent air flows // Combust. Sci. Technol., 2017. Vol. 189. No. 4. P. 683–697. doi: 10.1080/00102202.2016.1246441.
35. DeLuca L. T., Galfetti L., Severini F., Rossetini L., Meda L., Marra G., D'Andrea B., Weiser V., Calabro M., Vorozhtsov A. B., Glazunov A. A., Pavlovets G. J. Physical and ballistic characterization of AlH₃-based space propellants // Aerosp. Sci. Technol., 2007. Vol. 11. No. 1. P. 1–8.
36. Pang W., Fan X., Zhao F., Xu H., Zhang W., Yu H., Li Y., Liu F., Xie W., Yan N. Effects of different metal fuels on the characteristics for HTPB-based fuel rich solid propellants // Propell. Explos. Pyrot., 2013. Vol. 38. No. 6. P. 852–859. doi: 10.1002/prep.201200182.
37. Liu L., Wen Z., Ao W., Gou D., Liu P., Li L. K. B., He G. Effects of AlH₃ particle size and loading on the combustion and agglomeration of solid propellants // Com-

- bust. Flame, 2024. Vol. 262. No. 113327. P. 1–11. doi: 10.1016/j.combustflame.2024.113327.
38. Zhukov A., Zhukov I., Ziatdinov M., Promakhov V., Vorozhtsov A., Vorozhtsov S., Dubkova Y. Self-propagating high-temperature synthesis of energetic borides // AIP Conf. Proc., 2016. Vol. 1772. P. 020015. doi: 10.1063/1.4964537. <http://scitation.aip.org/content/aip/proceeding/aipcp/0.1063/1.4964537>.
39. Корчагин М.А., Гаврилов А.И., Бохонов Б.Б., Булина Н.В., Зарко В.Е. Получение диборида алюминия методом теплового взрыва в механически активированных смесях исходных реагентов // Физика горения и взрыва, 2018. Т. 54. № 4. С. 45–54.
40. Ao W., Fan Z., Lu L., An Y., Ren J., Zhao M., Liu P., Li L. K. B. Agglomeration and combustion characteristics of solid composite propellants containing aluminum-based alloys // Combust. Flame, 2020. Vol. 220. P. 288–297. doi: 10.1016/j.combustflame.2020.07.004.
41. Nie H., Pisharath S., Hng H. H. Combustion of fluoropolymer coated Al and Al–Mg alloy powders // Combust. Flame, 2020. Vol. 220. P. 394–406. doi: 10.1016/j.combustflame.2020.07.016.
42. Pang W. Q., Yetter R. A., DeLuca L. T., Zarko V. E., Gany A., Zhanga X. H. Boron-based composite energetic materials (B-CEMs): Preparation, combustion and applications // Prog. Energ. Combust., 2022. Vol. 93. P. 101038. doi: 10.1016/j.pecs.2022.101038.
43. Liang D., Liu J., Zhou Y., Zhou J. Ignition and combustion characteristics of amorphous boron and coated boron particles in oxygen jet // Combust. Flame, 2017. Vol. 185. P. 292–300. doi: 10.1016/j.combustflame.2017.07.030.
44. Wang Y., Hagen E., Biswas P., Wang H., Zachariah M. R. Imaging the combustion characteristics of Al, B, and Ti composites // Combust. Flame, 2023. Vol. 252. No. 112747. P. 1–10. doi: 10.1016/j.combustflame.2023.112747.
45. Гусейнов Ш.Л., Федоров С.Г. Нанопорошки алюминия, бора, боридов алюминия и кремния в высокоэнергетических материалах. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2015. 256 с.
46. Ягодников Д.А., Воронецкий А.В., Сарабьев В.И. Воспламенение и горение пиротехнических составов на основе микро- и наночастиц диборида алюминия в воздушном потоке в двухзонной камере сгорания // Физика горения и взрыва, 2016. Т. 52. № 3. С. 51–58.
47. Ягодников Д.А., Гусейнов Ш.Л., Стороженко П.А., Шпара А.П., Сухов А.В., Федоров С.Г. Морфологический, химический и спектральный анализы продуктов сгорания микро- и нанодисперсных частиц боридов алюминия // Докл. Акад. наук, 2019. Т. 484. № 1. С. 44–47. doi: 10.31857/S0869-5652484144-47.
48. Korotkikh A. G., Glotov O. G., Arkhipov V. A., Zarko V. E., Kiskin A. B. Effect of iron and boron ultrafine powders on combustion of aluminized solid propellants // Combust. Flame, 2017. Vol. 178. P. 195–204. doi: 10.1016/j.combustflame.2017.01.004.
49. Hongqi N., Sreekumar P., Huey H. H. Combustion of fluoropolymer coated Al and Al–Mg alloy powders // Combust. Flame, 2020. Vol. 220. P. 394–406.
50. Wang L., Liu H., Liu M., Wang N. F. Experimental observations on disruptive burning of coated aluminum particles // Int. J. Energetic Materials Chemical Propulsion, 2002. Vol. 2. No. 1–6. P. 407–411. doi: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.v5.i1-6.440.
51. Sossi A., Duranti E., Manzoni M., Paravan C., DeLuca L. T., Vorozhtsov A. B., Lerner M. I., Rodkevich N. G., Gromov A. A., Savin N. Combustion of HTPB-based solid fuels loaded with coated nanoaluminum // Combust. Sci. Technol., 2015. Vol. 185, No. 1. P. 17–36. doi: 10.1080/00102202.2012.707261.
52. Baek J., Jiang Y., Demko A. R., Jimenez-Thomas A. R., Vallez L., Ka D., Xia Y., Zheng X. Effect of fluoroalkylsilane surface functionalization on boron combustion // ACS Appl. Mater. Inter., 2022. Vol. 14. No. 17. P. 20190–20196. doi: 10.1021/acsami.2c00347.
53. Nie H., Pisharath S., Hng H. H. Combustion of fluoropolymer coated Al and Al–Mg alloy powders // Combust. Flame, 2020. Vol. 220. P. 394–406. doi: 10.1016/j.combustflame.2020.07.016.
54. Zhao B., Sun S., Luo Y., Cheng Y. Fabrication of polytetrafluoroethylene coated micron aluminium with enhanced oxidation // Materials, 2020. Vol. 13. No. 15. Paper 3384. 15 p. doi: 10.3390/ma13153384.
55. Xu P., Liu J., Chen X., Zhang W., Zhou J., Wei X. Ignition and combustion of boron particles coated by modified materials with various action mechanisms // Combust. Flame, 2022. Vol. 242. No. 112208. P. 1–11. doi: 10.1016/j.combustflame.2022.112208.
56. He W., Lyu J. Y., Tang D. Y., He G. Q., Liu P. J., Yan Q. L. Control the combustion behavior of solid propellants by using core-shell Al-based composites // Combust. Flame, 2020. Vol. 221. P. 441–452. doi: 10.1016/j.combustflame.2020.07.006.
57. Мееров Д.Б., Моногаров К.А., Муравьев Н.В., Фоменков И.В., Васильев А.Л., Шишов Н.И., Пивкина А.Н. Перспективы использования порошков бора в качестве горючего. III. Влияние полимерного связующего на состав конденсированных продуктов газификации борсодержащих модельных композиций // Физика горения и взрыва, 2021. Т. 57. № 5. С. 42–54.

Поступила в редакцию 09.07.2024