

# НАНОТЕРМИТЫ С УПРАВЛЯЕМЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ГОРЕНИЯ — НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ МИКРОТРАСТЕРОВ\*

В. Г. Кириленко<sup>1</sup>, А. Ю. Долгобородов<sup>2</sup>, М. А. Бражников<sup>3</sup>

**Аннотация:** Проведены экспериментальные исследования распространения высокоскоростного горения наноразмерной термитной смеси Al + CuO. С помощью скоростной видеорегистрации и измерений давления в реагирующей смеси получены новые данные, подтверждающие гипотезу об определяющей роли градиента давления промежуточных газообразных продуктов реакции в процессе высокоскоростного распространения реакции при горении нанотермитов (НТ). Результаты экспериментов подтверждают основные положения разработанной ранее модели распространения процесса горения в пористых зарядах НТ. Исследована возможность использования НТ в качестве топлива для микротрастера. Для проверки возможностей управления характеристиками горения нанотермитной смеси исследовано влияние газогенерирующей добавки (нитрогуанидин) на скорость горения в стальной трубке и развиваемый удельный импульс. Установлено, что введение в исходный состав НТ 15 % (масс.) нитрогуанидина более чем в 2 раза увеличивает скорость горения и почти в 4 раза — удельный импульс нанотермитной смеси.

**Ключевые слова:** нанотермиты; пористость; зона воспламенения; скорость горения; градиент давления; нитрогуанидин; удельный импульс; микротрастер

DOI: 10.30826/CE25180311

EDN: JCMYAP

## Литература

1. *Pantoya M., Granier J.* The effect of slow heating rates on the reaction mechanisms of nano and micron composite thermite reactions // *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2006. Vol. 85. P. 37–43. doi: 10.1007/s10973-005-7342-z.
2. *Zarko V. E., Gromov A. A.* Energetic nanomaterials: Synthesis, characterization, and application. — Amsterdam: Elsevier, 2016. 392 p.
3. *Bhattacharya S., Agarwal A. K., Rajagopalan T., Patel V. K.* Nano-energetic materials: Energy, environment and sustainability. — Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019. 305 p.
4. *Yetter R.* Progress towards nanoengineered energetic materials // *P. Combust. Inst.*, 2021. Vol. 38. No. 1. P. 57–81. doi: 10.1016/j.proci.2020.09.008.
5. *Polis M., Stolarczyk A., Glosz K., Jarosz T.* Quo vadis, nanothermite? A review of recent progress // *Materials*, 2022. Vol. 15. No. 9. P. 3215. doi: 10.3390/ma15093215.
6. *Pillemon L., Estève A., Simonin O., Bédard B., Rossi C.* Modèle CFD pour la combustion d'aluminothermites. — CNRS, 2023. HAL-04245310. <https://laas.hal.science/hal-04245310>.
7. *Кириленко В. Г., Гришин Л. И., Долгобородов А. Ю., Бражников М. А.* Лазерное инициирование нанотермитов Al/CuO и Al/Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // *Горение и взрыв*, 2020. Т. 13. № 1. С. 145–155.
8. *Dolgorodov A. Yu., Kirilenko V. G., Brazhnikov M. A., Grishin L. I., Kuskov M. L., Valyano G. E.* Ignition of nanothermites by a laser diode pulse // *Defence Technology*, 2022. Vol. 18. No. 2. P. 194–204. doi: 10.1016/j.dt.2021.01.006.
9. *Кириленко В. Г., Гришин Л. И., Долгобородов А. Ю., Бражников М. А., Кусков М. Л., Вальяно Г. Е.* Особенности горения нанотермитов на основе наноалюминия при лазерном инициировании // *Горение и взрыв*, 2022. Т. 15. № 1. С. 82–97. doi: 10.1007/BF02671857.
10. *Кириленко В. Г., Долгобородов А. Ю., Бражников М. А., Кусков М. Л.* Механизм распространения горения в пористых нанотермитах // *Хим. физика*, 2023. Т. 42. № 8. С. 27–38. doi: 10.31857/S0207401X23080058.
11. *Кириленко В. Г., Долгобородов А. Ю., Бражников М. А.* Передача горения в высокопористых нанотермитах через инертные преграды // *Горение и взрыв*, 2023. Т. 16. № 3. С. 83–92. doi: 10.30826/CE23160308.
12. *Кириленко В. Г., Долгобородов А. Ю., Бражников М. А., Шамишин И. О.* Новый метод исследования механизма распространения горения в пористых нанотермитах // *Горение и взрыв*, 2023. Т. 16. № 4. С. 106–118. doi: 10.30826/CE23160410.

\*Основная часть данной работы выполнена в ФИЦ ХФ РАН (Программа фундаментальных научных исследований РФ «Химическая физика окисления, горения и взрыва», № 1024040200065-4), часть работы по изготовлению образцов и определению структуры нанотермитов выполнена в ОИВТ РАН в рамках выполнения государственного задания на проведение фундаментальных научных исследований № 075-00269-25-00.

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, vladkiril@gmail.com

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, aldol@ihed.ras.ru

<sup>3</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, birze@inbox.ru

13. Sanders V., Asay B., Foley T., Tappan B., Pacheco A., Son S. Reaction propagation of four nanoscale energetic composites (Al/MoO<sub>3</sub>, Al/WO<sub>3</sub>, Al/CuO, and Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) // J. Propul. Power, 2007. Vol. 23. P. 707–714. doi: 10.2514/1.26089.
14. Weismiller M. R., Malchi J. Y., Yetter R. A., Foley T. J. Dependence of flame propagation on pressure and pressurizing gas for an Al/CuO nanoscale thermite // P. Combust. Inst., 2009. Vol. 32. P. 1895–1903. doi: 10.1016/j.proci.2008.06.191.
15. Densmore J. M., Sullivan K. T., Gash A. E., Kuntz J. D. Expansion behavior and temperature mapping of thermites in burn tubes as a function of fill length // Propell. Explos. Pyrot., 2014. Vol. 39. P. 416–422. doi: 10.1002/prep.201400024.
16. Egan G., Zachariah M. Commentary on the heat transfer mechanisms controlling propagation in nanothermites // Combust. Flame, 2015. Vol. 162. No. 7. P. 2959–2961. doi: 10.1016/j.combustflame.2015.04.013.
17. Baijot V., Rouhani M., Rossi C., Esteve A. A multi-phase micro-kinetic model for simulating aluminum-based thermite reactions // Combust. Flame, 2017. Vol. 180. P. 10–19. doi: 10.1016/j.combustflame.2017.02.031.
18. Jacob R., Kline D., Zachariah M. High speed 2-dimensional temperature measurements of nanothermite composites: Probing thermal vs. gas generation effects // J. Appl. Phys., 2018. Vol. 123. No. 11. doi: 10.1063/1.5021890.
19. Wang Y., Dai Ji, Xu J., Shen Y., Wang Ch., Ye Y., Shen R. Experimental and numerical investigations of the effect of charge density and scale on the heat transfer behavior of Al/CuO nano-thermite // Vacuum, 2021. Vol. 184. P. 109878. doi: 10.1016/j.vacuum.2020.109878.
20. Sullivan K., Zachariah M. R. Simultaneous pressure and optical measurements of nanoaluminum thermites: Investigating the reaction mechanism // J. Propul. Power, 2010. Vol. 26. P. 467–472. doi: 10.2514/1.45834.
21. Saceleanu F., Idir M., Chaumeix N., Wen J. Z. Combustion characteristics of physically mixed 40 nm aluminum/copper oxide nanothermites using laser ignition // Front. Chem., 2018. Vol. 6. Article 465. doi: 10.3389/fchem.2018.00465.
22. Jabraoui H., Esteve A., Schoenitz M., Dreizin E., Rossi C. atomic scale insights into the first reaction stages prior to Al/CuO nanothermite ignition: Influence of porosity // ACS Appl. Mater. Inter., 2022. Vol. 14. No. 25. P. 29451–29461. doi: 10.1021/acsaami.2c07069.
23. Kaviany M. Principles of heat transfer in porous media. — Mechanical engineering ser. — 2nd ed. — New York, NY, USA: Springer-Verlag Inc., 1995. 734 p. doi: 10.1007/978-1-4612-4254-3.
24. Ген М. Я., Миллер А. В. Способ получения аэрозолей металлов. Патент SU 814432, 1961.
25. Kuskov M. L., Zhigach A. N., Leipunskii I. O., Gorbachev A. N., Afanasenkova E. S., Safronova O. A. Combined equipment for synthesis of ultrafine metals and metal compounds powders via flow-levitation and crucible methods // IOP Conf. Ser. — Mat. Sci., 2019. Vol. 558. P. 012022. doi: 10.1088/1757-899X/558/1/012022.
26. Streletskii A. N., Kolbanov I. V., Vorobieva G. A., Dolgoborodov A. Y., Kirilenko V. G., Yankovskii B. D. Kinetics of mechanical activation of Al/CuO thermite // J. Mater. Sci., 2018. Vol. 53. No. 19. P. 13550–13559. doi: 10.1007/s10853-018-2412-3.
27. Долгобородов А. Ю., Кириленко В. Г., Стрелецкий А. Н., Колбанев И. В., Шевченко А. А., Янковский Б. Д., Ананьев С. Ю., Вальяно Г. Е. Механоактивированный термитный состав Al/CuO // Горение и взрыв, 2018. Т. 11. № 3. С. 117–124.
28. Патрикеев Д. И., Колесов В. И., Егоршев В. Ю. Сравнительные исследования импульса взрывчатого превращения нанотермитов // Горение и взрыв, 2022. Т. 15. № 2. С. 102–107. doi: 10.30826/CE22150210.
29. Fahd A., Baranovsky A., Dubois C., Chaouki J., Elbasuney S., Shokry S. Thrust characteristics of nanocarbon/Al/oxygenated salt nanothermites for microenergetic applications // Defense Technology, 2023, Vol. 30. P. 55–59. doi: 10.1016/j.dt.2023.03.009.
30. Dai J., Wang F., Ru C., Xu J., Wang C., Zhang W., Ye Y., Shen R. Ammonium perchlorate as an effective additive for enhancing the combustion and propulsion performance of Al/CuO nanothermites // J. Phys. Chem. C, 2018. Vol. 122. Iss. 18. P. 10240–10247. doi: 10.1021/acs.jpcc.8b01514.

Поступила в редакцию 23.12.2024

После доработки 30.01.2025

Принята к публикации 10.02.2025