

# НОВЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГОРЕНИЯ В ПОРИСТЫХ НАНОТЕРМИТАХ

В. Г. Кириленко<sup>1</sup>, А. Ю. Долгобородов<sup>2</sup>, М. А. Бражников<sup>3</sup>, И. О. Шамшин<sup>4</sup>

**Аннотация:** В работе нашли свое отражение результаты новых экспериментальных исследований механизма распространения горения нанотермитов (НТ) Al/CuO в замкнутых оболочках (трубках) из кварцевого стекла с использованием пористых инертных преград и передачи горения через них. Для улучшения пространственного разрешения в этих экспериментах наряду с цветной видеокамерой Phantom Miro LC310 производства Vision Research Corp. (США) была использована черно-белая камера японского производства Photron Fastcam SA-Z 2100K с повышенной (в видимом спектральном диапазоне) чувствительностью и возможностью осуществлять видеорегистрацию со скоростью до 1 млн кадр/с при фиксированной экспозиции кадра  $\sim 158$  нс. В экспериментах в качестве инертных преград использовались вискоза, полые стеклянные микросферы, порошок хлорида натрия и кварцевый песок. При прохождении преград из вискозы и микросфер (до 40 мкм) происходило инициирование состава, расположенного за преградой, при этом скорость распространения светящегося фронта (которую мы связываем со скоростью горения в НТ) снижалась, однако после выхода из преграды в НТ — восстанавливалась до исходной величины. Преграды из порошков соли и кварцевого песка (размер фракции  $\sim 80$  мкм) аналогичной длины останавливали дальнейшее распространение реакции горения (РРГ). Исследование процесса РРГ через преграды позволило уточнить разрабатываемую модель горения пористых НТ.

**Ключевые слова:** нанотермиты; инертная преграда; пористость; градиент давления; скорость горения

DOI: 10.30826/CE23160410

EDN: PQSWUE

## 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. 485 p.
3. Nano-energetic materials: Energy, environment and sustainability / Eds. S. Bhattacharya, A. K. Agarwal, T. Rajagopalan, V. K. Patel. — Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019. 290 p.
4. Yetter R. A. 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. Pillemont 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. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Bajot 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.
11. 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. P. 113101. doi: 10.1063/1.5021890.

<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

<sup>4</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ; Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, igor\_shamshin@mail.ru

12. 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. doi: 10.1016/j.vacuum.2020.109878.
13. Dolgoborodov A. Yu., Kirilenko V. G., Brazhnikov M. A., Grishin L. I., Kuskov M. L., Vallyano 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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/acsami.2c07069.
19. 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.
20. Еришов А. П. Конвективная детонационная волна в пористой структуре // *Физика горения и взрыва*, 1997. Т. 33. № 1. С. 98–106.
21. 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. 87–98. doi: 10.30826/CE23160308.
22. Ген М. Я., Миллер А. В. Способ получения аэрозолей металлов. Патент SU 814432, 1961.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. Li Yong, Li Jian, Liu Xian, Wu Bei. Test and analysis of the porosity of cotton fiber assembly // *J. Eng. Fiber. Fabr.*, 2021. Vol. 16. P. 1–7. doi: 10.1177/15589250211024225.
28. Гребер Г., Эрк С., Григуль У. Основы учения о теплообмене / Пер. с нем. — М.: ИЛ, 1958. 558 с. (Gröber H., Erk S., Grigull U. Die Grundgesetze der Wärmeübertragung. — Berlin: Springer-Verlag, 1955. 444 p.)

Поступила в редакцию 20.11.2023