

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ НАНОТЕРМИТОВ НА ОСНОВЕ НАНОАЛЮМИНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ИНИЦИИРОВАНИИ

В. Г. Кириленко¹, Л. И. Гришин², А. Ю. Долгобородов³, М. А. Бражников⁴, М. Л. Кусков⁵, Г. Е. Вальяно⁶

Аннотация: Приведены результаты исследования процесса лазерного инициирования термитных смесей наноразмерных порошков Al с оксидами меди, висмута, молибдена и никеля. Получены новые данные о минимальной энергии инициирования и скорости горения в зависимости от плотности и соотношения компонентов. Инициирование осуществлялось импульсом лазерного диода с длиной волны 808 нм, плотность мощности излучения до 700 Вт/см². Параметры процесса регистрировались с помощью многоканального пирометра и высокоскоростной видеокамеры. Проведено измерение яркостной температуры продуктов горения нанотермитов (НТ). Изучено влияние инертных светопоглощающих наноразмерных добавок на пороговые параметры лазерного импульса и скорость горения. На основании полученных результатов выдвинуты предположения о механизме инициирования и протекании реакции при воздействии лазерного излучения.

Ключевые слова: нанотермиты; лазерное инициирование; скорость горения; задержка воспламенения; светопоглощающие добавки; пористость

DOI: 10.30826/CE22150110

Литература

1. Бриш А. А., Галеев И. А., Зайцев Б. Н., Сбитнев Е. А., Татаринцев Л. В. Возбуждение детонации конденсированных ВВ излучением оптического квантового генератора // Физика горения и взрыва, 1966. Т. 2. № 3. С. 132–133.
2. Sivan J., Haas Y., Grinstein D., Kochav Sh., Yegudayev G., Kalontarov L. Boron particle size effect on B/KNO₃ ignition by a diode laser // Combust. Flame. 2015. Vol. 162. Iss. 2. P. 516–527.
3. Herreros D. N., Fang X. Laser ignition of elastomer-modified cast double-base (EMCDB) propellant using a diode laser // Opt. Laser Technol., 2017. Vol. 89. P. 21–26.
4. Kim Ji Hoon, Cho Myung Hoon, Kim Kyung Ju, Kim Soo Hyung. Laser ignition and controlled explosion of nanoenergetic materials: The role of multi-walled carbon nanotubes // Carbon, 2017. Vol. 118. P. 268–277. doi: 10.1016/j.carbon.2017.03.050.
5. Korotkikh A. G., Sorokin I. V., Selikhova E. A., Arkhipov V. A. Effect of B, Fe, Ti, Cu nanopowders on the laser ignition of Al-based high-energy materials // Combust. Flame, 2020. Vol. 222. P. 103–110.
6. Hu Peng, Xian Mingchun, Wu Lizhi, Zhang Haonan, Ye Yinghua, Shen Ruiqi. Laser ignition of a laser-thermal differential composite system based on non-uniform absorption // Chem. Eng. J., 2021. Vol. 421. Part 2. doi: 10.1016/j.cej.2020.127869.
7. Uhlenhake K. E., Olsen D., Gomez M., Örneк M., Zhou M., Son S. F. Photoflash and laser ignition of full density nano-aluminum PVDF films // Combust. Flame, 2021. Vol. 233. doi: 10.1016/j.combustflame.2021.111570.
8. Energetic nanomaterials: Synthesis, characterization, and application / Eds. V. E. Zarko, A. A. Gromov. — Amsterdam: Elsevier, 2016. 485 p.
9. 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.
10. Nano-energetic materials: Energy, Environment and sustainability / Eds. S. Bhattacharya, A. K. Agarwal, T. Rajagopalan, V. K. Patel. — Springer, Singapore, 2019. 305 p.
11. Pantoya M., Granier J. Laser ignition of nanocomposite thermites // Combust. Flame, 2004. Vol. 138(4). P. 373–383.
12. Sanders V., Asay B., Foley T., Tappan B., Pacheco A., Son S. Reaction propagation of four nanoscale energetic

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

²Объединенный институт высоких температур Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», lenya-grishin@mail.ru

³Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Объединенный институт высоких температур Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», aldol@ihed.ras.ru

⁴Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, birze@inbox.ru

⁵Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, mkuskov72@gmail.com

⁶Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, gev06@bk.ru

- composites (Al/MoO₃, Al/WO₃, Al/CuO, and Bi₂O₃) // J. Propul. Power, 2007. Vol. 23. P. 707–714.
13. Egorshv V. Y., Sinditskii V. P., Yartsev K. K. Combustion of high-density CuO/Al nanothermites at elevated pressures // 10th Autumn Seminar (International) on Propellants, Explosives and Pyrotechnics Proceedings, 2013. P. 287–290.
 14. Petre C., Chamberland D., Ringuette T., Ringuette S., Paradis S., Stowe R. Low-power laser ignition of aluminum/metal oxide nanothermites // Int. J. Energetic Materials Chemical Propulsion, 2014. Vol. 13. P. 479–494.
 15. Адуев Б. П., Ананьева М. В., Звекоев А. А., Каленский А. В., Кригер В. Г., Никитин А. П. Микроочаговая модель лазерного инициирования взрывного разложения энергетических материалов с учетом плавления // Физика горения и взрыва, 2014. Т. 50. № 6. С. 92–99.
 16. Колесов В. И., Патрикеев Д. И. Горение нанотермитов в вакууме // Горение и взрыв, 2017. Т. 10. № 1. С. 69–72.
 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. Гордеев В. В., Казутин М. В., Козырев Н. В., Кашикаров А. О., Рубцов И. А., Тен К. А., Рафейчик С. И. Исследование механизма горения нанотермитных систем // Ползуновский вестник, 2018. № 2. С. 96–101.
 19. Кириленко В. Г., Гришин Л. И., Долгобородов А. Ю., Бражников М. А. Лазерное инициирование нанотермитов Al/CuO и Al/Bi₂O₃ // Горение и взрыв, 2020. Т. 13. № 1. С. 145–155.
 20. Dolgoborodov 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. Iss. 2. P. 194–204. doi: 10.1016/j.dt.2021.01.006.
 21. Guen M. Y., Miller A. V. Method for production of metal aerosols. SU Patent 814432, 1961.
 22. 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.
 23. 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.
 24. Streletskii A. N., Kolbanev 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.
 25. Yankovsky B. D., Dolgoborodov A. Yu., Grishin L. I., Ananev S. Yu. Study of combustion wave propagation in linear charges from mechanically activated thermite mixtures // J. Phys. Conf. Ser., 2021. Vol. 1787. P. 012017. doi: 10.1088/1742-6596/1787/1/012017.
 26. Гоголя М. Ф. Температуры ударного сжатия конденсированных сред. — М.: МИФИ, 1988. 68 с.
 27. Гришенин С. Г., Солодовников А. А., Старцев Г. П. Фотографический метод измерения температуры источников света // Труды Комиссии по пирометрии при ВНИИМ. — М.: Стандартгиз, 1958. Сб. 1.

Поступила в редакцию 24.12.2021