

# ИЗУЧЕНИЕ РЕАКЦИИ ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛОВ ПИКРИНОВОЙ КИСЛОТЫ НА НАНОМАСШТАБНОЕ МЕХАНИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ\*

Е. К. Косарева<sup>1</sup>, Р. В. Гайнутдинов<sup>2</sup>, Н. В. Муравьев<sup>3</sup>

**Аннотация:** Работа посвящена изучению реакции поверхности отдельных кристаллов пикриновой кислоты на наномасштабное механическое воздействие с целью понимания процессов, лежащих в основе инициирования энергетических материалов (ЭМ). С помощью методов атомно-силовой микроскопии (АСМ) реализованы три вида локального механического воздействия: наноиндентирование, воздействие трением и ударом. Установлено, что наноразмерное воздействие на кристалл приводит к исчезновению материала его поверхности. Кроме того обнаружено, что реакция на механическое воздействие неодинакова для различных граней кристалла. Также выяснено, что при повышении влажности наблюдаемый эффект замедляется, что, вероятно, связано с взаимодействием поверхности пикриновой кислоты с водой.

**Ключевые слова:** атомно-силовая микроскопия; сканирующая зондовая микроскопия; пикриновая кислота

DOI: 10.30826/CE22150211

EDN: AJUSJB

## Литература

1. Афанасьев Г. Т., Боболев В. К. Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом. — М.: Наука, 1968. 172 с.
2. Field J. E., Bourne N. K., Palmer S. J. P., Walley S. M., Sharma J., B. C. Beard B. C. Hot-spot ignition mechanisms for explosives and propellants [and discussion] // Philos. T. Roy. Soc. A, 1992. Vol. 339. No. 1654. P. 269–283.
3. Armstrong R. W., Ammon H. L., Elban W. L., Tsai D. H. Investigation of hot spot characteristics in energetic crystals // Thermochim. Acta, 2002. Vol. 384. No. 1–2. P. 303–313. doi: 10.1016/S0040-6031(01)00786-9.
4. Дубовик А. В. Чувствительность твердых взрывчатых систем к удару. — М.: ПХТУ им. Д. И. Менделеева, 2011. 276 с.
5. Hua C., Zhang P.-J., Lu X.-J., Huang M., Dai B., Fu H. 2013. Research on the size of defects inside RDX/HMX crystal and shock sensitivity // Propell. Explos. Pyrot., 2013. Vol. 38. P. 775–780. doi: 10.1002/prep.201200200.
6. Yan Z., Liu W., Zhang C., Wang X., Li J., Yang Z., Xi-ang X., Huang M., Tan B., Zhou G., Liao W., Li Z., Li L., Yan H., Yuan X., Zu X. Quantitative correlation between facets defects of RDX crystals and their laser sensitivity // J. Hazard. Mater., 2016. Vol. 313. P. 103–111. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.03.071.
7. Weeks B. L., Weese R. K., Zaig J. M. Energetic materials and atomic force microscopy: Structure and kinetics // 12th Detonation Symposium (International). — San Diego, CA, USA, 2002. 10 p.
8. Tian Q., Yan G., Sun G., Huang Ch., Xie L., Chen B., Huang M., Li H., Liu Y., Wang J. Thermally induced damage in hexanitrohexaazaisowurtzitanе // Cent. Eur. J. Energ. Mat., 2013. Vol. 10. No. 2. P. 359–369.
9. Burnham A. K., Qiu S. R., Pitchimani R., Weeks B. L. Comparison of kinetic and thermodynamic parameters of single crystal pentaerythritol tetranitrate using atomic force microscopy and thermogravimetric analysis: Implications on coarsening mechanisms // J. Appl. Phys., 2009. Vol. 105. P. 104312. doi: 10.1063/1.3129504.
10. Burch A. C., John D. Y., Bahr D. F. Nanoindentation of HMX and idoxuridine to determine mechanical similarity // Crystals, 2017. Vol. 7. No. 11. P. 335–344. doi: 10.3390/cryst7110335.
11. Kovalev A., Sturm H. Observation of nanoscale hot-spot generation on a 2, 4, 6-trinitrophenol (TNP) single crys-

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 075-15-2020-803 ИОХ РАН). Авторы выражают благодарность Ивану Вячеславовичу Ананьеву (Институт элементоорганических соединений им. А. Н. Несмеянова Российской академии наук) и Адаму Михальчуку (Федеральный институт исследований и испытаний материалов, Берлин, Германия) за помощь в определении индексов Миллера граней кристаллов.

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, catherine.kos@yandex.ru

<sup>2</sup>Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук, rgaunutdinov@gmail.com

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

- tal // Surf. Sci., 2011. Vol. 605. No. 17-18. P. 1747–1753. doi: 10.1016/j.susc.2011.06.012.
12. *Khabarov Y. G., Patrakeev A. A., Veshnyakov V. A., Kosyakov D. S., Ul'yanovskii N. V., Garkotin A. Yu.* One-step synthesis of picric acid from phenol // Org. Prep. Proced. Int., 2017. Vol. 49. No. 2. P. 178–181. doi: 10.1080/00304948.2017.1291008.
  13. *Muravyev N. V., Monogarov K. A., Melnikov I. N., Pivkina A. N., Kiselev V. G.* Learning to fly: Thermochemistry of energetic materials by modified thermogravimetric analysis and highly accurate quantum chemical calculations // Phys. Chem. Chem. Phys., 2021. Vol. 23. No. 29. P. 15522–15542. doi: 10.1039/D1CP02201F.
  14. *Fried L. E., Manaa M. R., Pagoria P. F., Simpson R. L.* Design and synthesis of energetic materials // Annu. Rev. Mater. Res., 2001. Vol. 31. No. 1. P. 291–321. doi: 10.1146/annurev.matsci.31.1.291.
  15. *Anczykowski B., Gotsmann B., Fuchs H., Cleveland J. P., Elings V. B.* How to measure energy dissipation in dynamic mode atomic force microscopy // Appl. Surf. Sci., 1999. Vol. 140. No. 3-4. P. 376–382. doi: 10.1016/S0169-4332(98)00558-3.
  16. *Орлова Е. Ю.* Химия и технология бризантных взрывчатых веществ. — Л.: Химия, 1981. 312 с.
  17. *Болдырев В. В.* Экспериментальные методы в механохимии твердых неорганических веществ. — Новосибирск: Наука, 1983. 65 с.

*Поступила в редакцию 27.12.2021*