

## ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА ВОСПЛАМЕНЕНИЕ КОМПОЗИТОВ Al/MoO<sub>3</sub>\*

М. В. Сивак<sup>1</sup>, А. Н. Стрелецкий<sup>2</sup>, А. А. Шевченко<sup>3</sup>, И. В. Колбанев<sup>4</sup>

**Аннотация:** Проанализированы факторы, влияющие на способность механически активированных энергетических композитов (МАЭК) Al/MoO<sub>3</sub> к воспламенению при их контакте с горячей подложкой. Для этого были приготовлены МАЭК с использованием частиц алюминия разных размеров (микронный, субмикронный, нано), морфологии (пластины и сферические частицы), а также с разной величиной поверхности контакта компонентов  $S_C$  и разной концентрацией точечных и линейных дефектов [N] в MoO<sub>3</sub>. Величину  $S_C$  варьировали дозой механической активации (МА), а [N] изменяли при отжиге активированного MoO<sub>3</sub> до разных температур. Оказалось, что зависимость времени воспламенения ( $\tau$ ) от температуры подложки можно аппроксимировать линейной зависимостью с двумя параметрами —  $T_0$  (минимальная температура, когда  $\tau \sim 1$  с) и  $T_\infty$ , при которой воспламенение еще не происходит. Показано, что для частиц алюминия сферической формы  $T_0$  и  $T_\infty$  уменьшаются с ростом величины поверхности контакта и коррелируют с концентрацией парамагнитных центров в MoO<sub>3</sub>. Минимальные величины  $T_0 = 355$  °С и  $T_\infty = 265$  °С были обнаружены для МАЭК, приготовленных из пластинчатых частиц алюминия. В этом случае величина поверхности контакта не является принципиально важной, а низкие температуры воспламенения могут быть обусловлены быстрым распространением очагов реакции из-за высокой теплопроводности пластин алюминия.

**Ключевые слова:** механическая активация; реакционная способность; энергонасыщенные композиты

### Литература

1. Dreizin E. Metal-based reactive nanomaterials // Prog. Energ. Combust., 2009. Vol. 35. P. 141–167. doi: 10.1016/j.peccs.2008.09.001.
2. Долгобородов А. Ю. Механоактивированные энергетические композиты окислитель–горючее // Физика горения и взрыва, 2015. Т. 51. № 1. С. 102–116.
3. Долгобородов А. Ю., Стрелецкий А. Н., Махов М. Н., Теселкин В. А., Гусейнов Ш. Л., Стороженко П. А., Форттов В. Е. Перспективные энергетические материалы на основе наноразмерных частиц кремния и твердых окислителей // Хим. физика, 2012. Т. 31. № 8. С. 37–44.
4. Sundaram D. S., Puri P., Yang V. A general theory of ignition and combustion of nano- and micron-sized aluminum particles // Combust. Flame, 2016. Vol. 169. P. 94–109. doi: 10.1016/j.combustflame.2016.04.005.
5. Baijot V., Mehdi D., 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.
6. Zakiyyan N., Wang A., Thiruvengadathan R., Staley C., Mathai J., Gangopadhyay K., Maschmann M. R., Gangopadhyay S. Combustion of aluminum nanoparticles and exfoliated 2D molybdenum trioxide composites // Combust. Flame, 2018. Vol. 187. P. 1–10. doi: 10.1016/j.combustflame.2017.08.027.
7. Streltskii A. N., Sivak M. V., Dolgoborodov A. Ju. Nature of high reactivity of metal/solid oxidizer nanocomposites prepared by mechanoactivation: A review // J. Mater. Sci., 2017. Vol. 52. P. 11810–11825. doi: 10.1007/s10853-017-1277-1.
8. Сивак М. В., Стрелецкий А. Н., Колбанев И. В., Леонов А. В., Дегтярев Е. Н. Термическая релаксация дефектов в наноразмерном механически активированном MoO<sub>3</sub> // Коллоидный ж., 2016. Т. 78. № 5. С. 618–628.
9. Trunov M. A., Schoenitz M., Zhu X., Dreizin Ed. Effect of polymorphic phase transformations in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film on oxidation kinetics of aluminum powders // Combust. Flame, 2005. Vol. 140. P. 310–318. doi: 10.1016/j.combustflame.2004.10.010.
10. Cabrera N., Mott N. Theory of the oxidation of metals // Rep. Prog. Phys., 1949. Vol. 12. P. 163.
11. Физические величины: Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991. 339 с.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 35 «Научные основы создания новых функциональных материалов» и проектов РФФИ № 16-03-00178а и № 16-29-01030офи-м.

<sup>1</sup> Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, sivak.mihail@gmail.com

<sup>2</sup> Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Московский физико-технический институт, str@center.chph.ras.ru

<sup>3</sup> Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, arsshechenko@inbox.ru

<sup>4</sup> Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, str@center.chph.ras.ru

12. *Волков А. В., Казанский Н. Л., Моисеев О. Ю., Полетаев С. Д.* Термоокислительная деструкция пленок

молибдена при лазерной абляции // *Ж. тех. физ.*, 2015. Т. 2. С. 107–111.

*Поступила в редакцию 12.01.18*

# INFLUENCE OF MECHANICAL ACTIVATION ON IGNITION OF ARESTED REACTIVE MILLING Al/MoO<sub>3</sub> COMPOSITES

M. V. Sivak<sup>1</sup>, A. N. Streletskii<sup>1,2</sup>, A. A. Shevchenko<sup>1</sup>, and I. V. Kolbanev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (State University), 9 Institutskiy Per., Dolgoprudny, Moscow Region 141701, Russian Federation

**Abstract:** The factors affecting the ability of Arrested Reactive Milling (ARM) nanocomposites Al/MoO<sub>3</sub> to be ignited by the hot substrate were analyzed. For this purpose, the composites using Al with different particle sizes (micro or nano) and morphology (spherical or lamellar) were prepared. Also, the concentration of defects in MoO<sub>3</sub> [N] and the value of contact surface  $S_c$  between ingredients were controlled. There are two critical parameters:  $T_0$  — the temperature of the substrate, at which the ignition delay time ( $\tau$ ) < 1 s; and  $T_\infty$  — the temperature of the substrate, below which no ignition occurs. It was found that between  $T_\infty$  and  $T_0$ , the ignition delay time ( $\tau$ ) depends linearly on substrate temperature. It is shown that  $T_\infty$  and  $T_0$  decrease with the contact surface area and correlate with the concentration of paramagnetic centers in MoO<sub>3</sub>. The minimum values of  $T_0 = 355$  °C and  $T_\infty = 265$  °C were found for ARM composites, prepared from lamellar aluminum particles. In this case, low ignition temperatures can be attained due to the rapid spread of sites of reaction initiation because of the high thermal conductivity of the aluminum flakes.

**Keywords:** nanothermites; MICs; ball milling; mechanochemistry

## Acknowledgments

The work was financially supported by the Basic Research Program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences No. 35 “Scientific foundations for the creation of new functional materials” and projects of the Russian Foundation for Basic Research No. 16-03-00178a and No. 16-29-01030.

## References

- Dreizin, E. 2009. Metal-based reactive nanomaterials. *Prog. Energ. Combust.* 35:141–167. doi: 10.1016/j.peccs.2008.09.001.
- Dolgoborodov, A. Yu. 2015. Mechanically activated oxidizer–fuel energetic composites. *Combust. Explo. Shock Waves* 51(1):86–99.
- Dolgoborodov, A. Yu., A. N. Streletskiy, M. N. Makhov, V. A. Teselkin, Sh. L. Guseinov, P. A. Storozhenko, and V. E. Fortov. 2012. Promising energetic materials composed of nanosilicon and solid oxidizers. *Russ. J. Phys. Chem. B* 6(4):523–530.
- Sundaram, D. S., P. Puri, and V. Yang. 2016. A general theory of ignition and combustion of nano- and micron-sized aluminum particles. *Combust. Flame* 169:94–109. doi: 10.1016/j.combustflame.2016.04.005.
- Baijot, V., D. Mehdi, C. Rossi, and A. Esteve. 2017. A multi-phase micro-kinetic model for simulating aluminum based thermite reactions. *Combust. Flame* 180:10–19. doi: 10.1016/j.combustflame.2017.02.031.
- Zakiyyan, N., A. Wang, R. Thiruvengadathan, C. Stalley, J. Mathai, K. Gangopadhyay, M. R. Maschmann, and S. Gangopadhyay. 2018. Combustion of aluminum nanoparticles and exfoliated 2D molybdenum trioxide composites. *Combust. Flame* 187:1–10. doi: 10.1016/j.combustflame.2017.08.027.
- Streletskii, A. N., M. V. Sivak, and A. Ju. Dolgoborodov. 2017. Nature of high reactivity of metal/solid oxidizer nanocomposites prepared by mechanoactivation: A review. *J. Mater. Sci.* 52:11810–11825. doi: 10.1007/s10853-017-1277-1.
- Sivak, M. V., A. N. Streletskiy, I. V. Kolbanev, A. V. Leonov, and E. N. Degtyarev. 2016. Thermal relaxation of defects in nanosized mechanically activated MoO<sub>3</sub>. *Colloid J.* 78(5):674–684.
- Trunov, M. A., M. Schoenitz, X. Zhu, and Ed. Dreizin. 2005. Effect of polymorphic phase transformations in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film on oxidation kinetics of aluminum powders. *Combust. Flame* 140:310–318. doi: 10.1016/j.combustflame.2004.10.010.
- Cabrera, N., and N. Mott. 1949. Theory of the oxidation of metals. *Rep. Prog. Phys.* 12:163.
- Grigor'ev, I. S., and E. Z. Meylikhov. 1991. *Fizicheskie velichiny: Spravochnik* [Physical quantities: Handbook]. Moscow: Energoatomizdat. 339 p.
- Volkov, A. V., N. L. Kazanskiy, O. Yu. Moiseev, and S. D. Poletaev. 2015. Thermal oxidative degradation of

molybdenum films under laser ablation. *Tech. Phys. Russ. J. Appl. Phys.* 60(2):265–269. doi: 10.1134/S1063784215020255.

*Received January 12, 2018*

## Contributors

**Sivak Mikhail V.** (b. 1985) — research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; [sivak.mihail@gmail.com](mailto:sivak.mihail@gmail.com)

**Streletskii Andrey N.** (b. 1945) — Doctor of Science in chemistry, head of laboratory, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; acting professor, Moscow Institute of Physics and Technology (State University), 9 Institutskiy Per., Dolgoprudny, Moscow Region 141701, Russian Federation; [str@center.chph.ras.ru](mailto:str@center.chph.ras.ru)

**Shevchenko Arseniy A.** (b. 1991) — research engineer, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; Ph.D. student, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; [arsshevchenko@inbox.ru](mailto:arsshevchenko@inbox.ru)

**Kolbanev Igor' V.** (b. 1937) — senior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; [str@center.chph.ras.ru](mailto:str@center.chph.ras.ru)