

## ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ 1Me-3H НА СИЛУ ВЗРЫВА НАНОТЕРМИТНЫХ СИСТЕМ SnO<sub>2</sub>/Al И WO<sub>3</sub>/Al

**В.В. Гордеев, М.В. Казутин, Н.В. Козырев**

*Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук  
(ИПХЭТ СО РАН), г. Бийск*

Нанотермиты рассматриваются как перспективные энергонасыщенные материалы для создания пиротехнических изделий широкого спектра, ввиду их способности горения в тонких слоях, микрограммовых навесках. Однако из-за высокой чувствительности нанотермитов к электрической искре и трению, сильно осложняется их практическое использование, в связи с чем актуален поиск добавок, снижающих чувствительность, но сохраняющих приемлемые параметры взрывчатых характеристик нанотермитных композиций. В качестве таковых добавок целесообразно использовать высокоэнтальпийные вещества, отличающиеся низкой чувствительностью. Одним из таких веществ является 1-метил-3-нитро-1,2,4-триазол (1Me-3H). В работе представлены результаты исследования силы взрыва (F) нанотермитных систем на основе оксида олова и алюминия SnO<sub>2</sub>/Al, оксида вольфрама и алюминия WO<sub>3</sub>/Al в зависимости от содержания 1Me-3H. Исследован ряд составов разной рецептурной компоновки (I и II): в компоновке I – соотношение компонентов в нанотермитной композиции соответствовало максимальной расчетной теплоте взрыва (Q) при заданном содержании 1Me-3H; II – соотношение компонентов базовой нанотермитной пары остается неизменным в тройных смесях. В системе SnO<sub>2</sub>/Al/1Me-3H выявлен экстремальный характер зависимости силы взрыва F от концентрации 1Me-3H, при этом максимальные значения F наблюдаются при содержании добавки 10 % для обоих рецептурных компоновок: I – F = 163 %; II – F = 160 %. Для системы WO<sub>3</sub>/Al/1Me-3H обоих рассмотренных рецептурных компоновок наблюдается монотонное снижение силы взрыва с ростом содержания 1Me-3H: при содержании добавки 15 % композиция теряет взрывчатые свойства (F=0 %). Нанотермитная система SnO<sub>2</sub>/Al/1Me-3H, как и ранее изученные CuO/Al/1Me-3H, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al/1Me-3H, MoO<sub>3</sub>/Al/Me-3H проявляет экстремальный характер зависимости силы взрыва F от содержания 1Me-3H, подтверждая ранее принятые положения о механизме реакционного взаимодействия в нанотермитных композициях с органическими добавками, тогда как для композиции WO<sub>3</sub>/Al/1Me-3H, по-видимому, присущ отличный от принятого механизм горения, требующий дополнительных исследований.

*Ключевые слова: нанотермиты, сила взрыва, рецептурная компоновка.*

### ВВЕДЕНИЕ

Нанотермитные смеси ввиду низких критических параметров (возможность горения в тонких слоях и микронавесках) являются перспективным материалом для создания микрогазовых пиротехнических изделий [1–5]. Высокая чувствительность к механическим и электростатическим воздействиям [6–8] усложняет практическое использование нанотермитных смесей. Ведётся активный поиск флегматизирующих добавок в нанотермитные смеси, способных снизить чувствительность без потери уникальных критических параметров взрывчатого превращения. Так, введение дисульфида молибдена, полианилина, фторполимеров (Viton А), синтетических каучуков (СКИ), углеродных материалов (графит, графен и т.п.) [8–15] позволяет снизить чувствительность нанотермитных систем, однако это приводит к значительному снижению взрывчатых характеристик (скорости горения, импульса взрыва) композиций относительно базовых нанотермитных систем, вплоть до потери способности к горению в тонких слоях – например, нанотермиты на основе оксида меди с добавкой СКИ (CuO/Al/СКИ) не способны гореть в слоях толщиной

0,1 мм и менее. В ряде случаев при введении добавок отмечается рост взрывчатых параметров исследуемых композиций, например, в случае добавки оксида графена в систему Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al [11]. Использование в качестве добавок традиционных высокоэнергетических веществ (нитроцеллюлоза, гексоген) позволяет незначительно снизить чувствительность, при этом существенно увеличить взрывчатые характеристики нанотермитных композиций [4,16,17]. Рост взрывчатых параметров наблюдается только до определённой концентрации высокоэнергетического материала, после чего взрывчатые параметры исследуемых композиций (при испытаниях микрозарядов – менее 0,1 г) начинают снижаться.

Таким образом, до настоящего времени не удалось найти оптимальный материал для создания нанотермитных композиций, который обеспечивал бы приемлемую для массовой технологической переработки чувствительность и сохранил бы взрывчатые параметры составов. В настоящее время экспериментальные данные по влиянию добавок на свойства нанотермитных систем неоднозначны, в связи с чем описание природы взрывчатого превращения систем нанотермит/добавка и

понимание механизма горения затруднено и является актуальной научной задачей.

В наших работах [18–20] исследовались нанотермитные системы CuO/Al, MoO<sub>3</sub>/Al, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al с добавкой низкочувствительного высокоэнергетического материала 1-метил-3-нитро-1,2,4-триазола (1Ме-3Н) [21,22]. При введении 1Ме-3Н зависимость силы взрыва F нанотермитной композиции от содержания добавки имеет экстремальный характер, максимальные значения F варьируется от 120 до 330 % относительно базовых нанотермитных смесей, а предельное содержание добавки – от 9 до 30 % в зависимости от нанотермитной системы и рецептурной компоновки. Нанотермитные пары CuO/Al и MoO<sub>3</sub>/Al обладают высокими значениями энергетического потенциала (теплоты горения Q); пара Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al отличается высоким значением газовой выделению (за счет паров образующегося в реакциях горения висмута Bi) и лидирует по силе взрыва. Таким образом, для систем CuO/Al, MoO<sub>3</sub>/Al, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al «положительное влияние» на силу взрыва F от введения 1Ме-3Н предполагалось изначально, в экспериментальных работах [21, 22] получены количественные результаты.

Нанотермитные пары SnO<sub>2</sub>/Al, WO<sub>3</sub>/Al обладают значительно меньшими расчетными значениями энергетического потенциала (выраженного теплотой горения Q) и газообразования (выраженного давлением газов P при моделировании адиабатического горения в изохорных условиях) по сравнению с системами на основе CuO/Al, MoO<sub>3</sub>/Al, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al.

Таким образом, априори невозможно прогнозировать характер влияния добавки 1Ме-3Н на силу взрыва нанотермитных композиций SnO<sub>2</sub>/Al/1Ме-3Н и WO<sub>3</sub>/Al/1Ме-3Н. Настоящая работа посвящена экспериментальным исследованиям этого влияния.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для наработки нанотермитных композиций использовались следующие материалы:

- Оксид олова SnO<sub>2</sub> («Плазмотерм», Россия) – средний размер частиц 40–60 нм;
- Оксид вольфрама WO<sub>3</sub> («Плазмотерм», Россия) – средний размер частиц 50–100 нм;
- Алюминий Al («Передовые порошковые технологии», Россия) – марка «Аlex», размер частиц 50-100 нм, содержание основного вещества 78 %;
- 1-метил-3-нитро-1,2,4-триазол (1Ме-3Н) – малочувствительное высокоэнергетическое вещество брутто-формулы C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>N<sub>4</sub>O<sub>2</sub>, температура плавления T<sub>пл</sub> ≈ 65 °С, температура разложения T<sub>разл</sub> ≈ 240–250 °С, энтальпия образования ΔH = 1,63 кДж/г.

Порядок изготовления нанотермитных композиций описан в работах [15,18–20].

В работе исследован ряд систем состава SnO<sub>2</sub>/Al/1Ме-3Н и WO<sub>3</sub>/Al/1Ме-3Н, отличающихся рецептурной компоновкой (I и II):

I. Соотношение компонентов базовой нанотермитной пары в тройной композиции соответствовало максимальной расчетной теплоте взрыва (Q) композиции при заданном содержании 1Ме-3Н;

II. Соотношение компонентов базовых нанотермитных пар SnO<sub>2</sub>/Al и WO<sub>3</sub>/Al (78/22 %, что соответствует максимальному расчетному значению Q) оставалось неизменным в тройных смесях SnO<sub>2</sub>/Al/1Ме-3Н и WO<sub>3</sub>/Al/1Ме-3Н.

В таблице 1 представлены составы композиций, изученных в данной работе, которые были подобраны на основе расчетов с использованием программного комплекса REAL [23].

Табл. 1. Составы исследуемых композиций

SnO <sub>2</sub> /Al/1Ме-3Н		WO <sub>3</sub> /Al/1Ме-3Н	
I	II	I	II
68/27/5	74/21/5	69/26/5	74/21/5
60/30/10	70/20/10	61/29/10	70/20/10
51/34/15	66/19/15	52/33/15	66/19/15
42/38/20	62/18/20	43/37/20	62/18/20

Методика измерения относительной силы взрыва F (%) подробно описана в работах [18–20]. Измерения проводились с использованием тензометрического датчика T24AM1-0,005 («Тензо-М», Россия). За базовый уровень величины F (100 %) принято экспериментальное значение, соответствующее нанотермитной паре SnO<sub>2</sub>/Al, WO<sub>3</sub>/Al – 78/22 %.

На рисунке 1 приведены графики зависимости силы взрыва от содержания добавки в композиции SnO<sub>2</sub>/Al/1Ме-3Н. Для нанотермита SnO<sub>2</sub>/Al, как и для ранее изученных нанотермитных систем зависимость F от концентрации 1Ме-3Н имеет экстремальный характер.

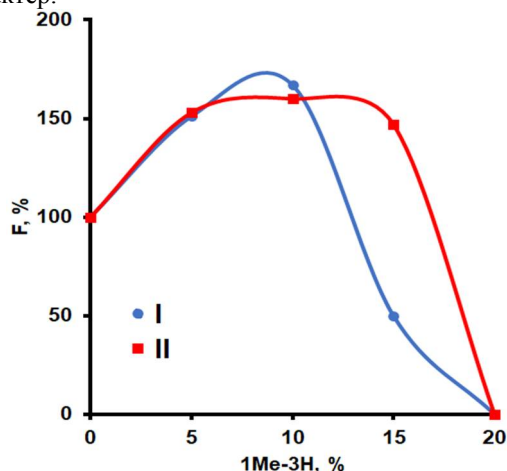


Рис 1. Зависимость силы взрыва от содержания 1Ме-3Н в нанотермитной системе SnO<sub>2</sub>/Al/1Ме-3Н различной рецептурной компоновки (I и II).

Максимальные значения силы взрыва композиции наблюдаются при содержании добавки 10 %:  $F = 163$  % при компоновке I,  $F = 160$  % при компоновке II. Дальнейшее увеличение содержания 1Me-3H приводит к снижению силы взрыва, при содержании 1Me-3H 20 % тензометрический датчик не регистрирует взрыв ( $F = 0\%$ ). Вместе с тем смесь без затруднений инициируется от электрической искры в миллиграммовых навесках и сгорает без взрыва. Стоит отметить, что в случае компоновки I при содержании добавки 15 % сила взрыва снижается вдвое относительно базовой нанотермитной пары ( $F = 50$  %), тогда как для компоновки II остается на достаточно высоком уровне ( $F = 147$  %) относительно базовой пары.

На рисунке 2 представлены графики зависимости силы взрыва от содержания добавки в нанотермитной композиции  $WO_3/Al/1Me-3H$ .

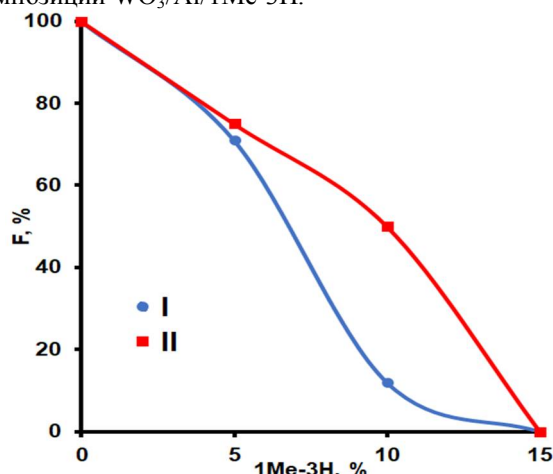


Рис. 2. Зависимость силы взрыва от содержания 1Me-3H в нанотермитной системе  $WO_3/Al/1Me-3H$  различной рецептурной компоновки (I и II).

Для системы  $WO_3/Al/1Me-3H$  зависимость силы взрыва от содержания 1Me-3H имеет нисходящий характер, при этом в случае рецептурной компоновки I значение  $F$  снижается быстрее с увеличением содержания 1Me-3H:

- компоновка I:  
5 % 1Me-3H –  $F = 71$  %;  
10 % 1Me-3H –  $F = 12$  %;
- компоновка II:  
5 % 1Me-3H –  $F = 75$  %;  
10 % 1Me-3H –  $F = 50$  %.

При содержании добавки 15 % зафиксировать взрыв на тензометрическом датчике не удастся ( $F = 0\%$ ), однако миллиграммовые навески инициируются от электрической искры и сгорают в самоподдерживающемся режиме.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Экстремальная зависимость силы взрыва  $F$  от содержания добавки 1Me-3H регистрировалась нами в

системах  $CuO/Al/1Me-3H$ ,  $Bi_2O_3/Al/1Me-3H$ ,  $MoO_3/Al/1Me-3H$  [18-20]. В настоящей работе аналогичный эффект подтверждается и для системы  $SnO_2/Al/1Me-3H$ . Совокупность полученных данных позволяет утверждать, что эффект повышения  $F$  от введения 1Me-3H тем выше, чем больше энергетический потенциал  $Q$  базовой нанотермитной пары – см. таблицу 2.

Табл. 2. Влияние добавки 1Me-3H на силу взрыва  $F$  нанотермитных композиций

Состав <sup>1</sup>	$Q$ , кДж/г	Максимальная сила взрыва $F$ , % относительно базовой нанотермитной пары при введении 1Me-3H
$MoO_3/Al$ 69/31 %	4,46	~330 % при содержании 1Me-3H 30 %
$CuO/Al$ 79/21 %	3,98	~185 % при содержании 1Me-3H 15 %
$WO_3/Al$ 78/22 %	2,81	введение 1Me-3H снижает $F$ пропорционально содержанию добавки
$SnO_2/Al$ 78/22 %	2,78	~163 % при содержании 1Me-3H 10 %
$Bi_2O_3/Al$ 87/13 %	2,05	~175 % при содержании 1Me-3H 15 %

Примечание:

<sup>1</sup> – соотношение компонентов соответствует максимальному расчетному значению  $Q$ .

В целом полученные данные подтверждают качественный механизм реакционного взаимодействия нанотермитных композиций с органическими добавками, описанный нами ранее, когда процесс горения рассматривается через модель конвективного горения в единичной поре [24,25]. Нанотермитной паре отводится «ведущая» роль в начальном тепловыделении системы, определяющим полноту разложения добавки и возможность участия продуктов ее разложения в общем энерговыделении системы с повышением  $F$ .

Качественная картина взрывчатого превращения включает последовательность реакций: экзотермического взаимодействия нанотермитной пары, эндотермической газификации добавки за счет тепла нанотермитной реакции, добавочного тепловыделения за счет реакций продуктов разложения добавки между собой и с продуктами реакции нанотермита.

Такая картина объясняет экстремальную зависимость силы взрыва от содержания добавок органической природы: при небольшом содержании последних величина  $F$  растет за счет повышения тепло- и газовыделения, дальнейшее увеличение содержания добавок приводит к снижению  $F$ , что объяснимо изменением энергетического баланса начальной стадии реакции: снижено количество первичного источника тепловыделения (нанотермитной пары), контактная поверхность между частицами нанотермитных компонентов нарушена прослойкой добавки, «охлаждающий» эффект эндотермического разложения последней ограничивает тепловыделение системы на начальной

стадии. В итоге происходит разброс непрореагировавших компонентов расширяющимися продуктами начальных реакций.

В случае системы  $WO_3/Al/1Me-3H$  наблюдается нарушение тенденции: сила взрыва монотонно снижается с увеличением содержания добавки.

Энергетический потенциал ( $Q$ ) нанотермитов  $SnO_2/Al$  и  $WO_3/Al$  примерно равен, и для системы  $WO_3/Al/1Me-3H$  логично было бы ожидать увеличение  $F$  до 160 % относительно базовой нанотермитной пары при содержании  $1Me-3H$  около 10 %.

Таким образом, для композиции  $WO_3/Al/1Me-3H$  вероятно, присущ отличный от рассмотренного ранее механизм горения, требующий дополнительных исследований.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что нанотермитная система  $SnO_2/Al/1Me-3H$ , как и ранее изученные  $CuO/Al/1Me-3H$ ,  $Bi_2O_3/Al/1Me-3H$ ,  $MoO_3/Al/1Me-3H$  [18-20], проявляет экстремальный характер зависимости силы взрыва  $F$  от содержания  $1Me-3H$ , подтверждая ранее принятые положения о механизме реакционного взаимодействия в нанотермитных композициях с органическими добавками.

Однако для системы  $WO_3/Al/1Me-3H$  наблюдается монотонное снижение силы взрыва  $F$  с ростом содержания  $1Me-3H$ , что нелогично в рамках принятых ранее положений и требует дополнительных детальных исследований.

Работа выполнена в рамках проекта по бюджетному финансированию № 0308–2021–0005 при использовании приборной базы Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Zhou, X. et al. "Influence of Al/CuO reactive multilayer films additives on exploding foil initiator," *J. Appl. Phys.*, Vol. 110, № 9, pp. 094505, 2011.
- Zhu, P. et al. "Energetic igniters realized by integrating Al/CuO reactive multilayer films with Cr films," *J. Appl. Phys.*, Vol. 110, № 7, pp. 074513, 2011.
- Ru, C. et al. "Superior performance of a MEMS-based solid propellant microthruster (SPM) array with nanothermites," *Microsyst. Technol.*, Vol. 23, № 8, pp. 3161–3174, 2017.
- Staley, C.S. et al. "Fast-Impulse Nanothermite Solid-Propellant Miniaturized Thrusters," *J. Propuls. Power.*, Vol. 29, № 6, pp. 1400–1409, 2013.
- Apperson, S.J. et al. "Characterization of Nanothermite Material for Solid-Fuel Microthruster Applications," *J. Propuls. Power.*, Vol. 25, № 5, pp. 1086–1091, 2009.
- Piercey, D.G. and T.M. Klapötke "Nanoscale Aluminum - Metal Oxide (Thermite) Reactions for Application in Energetic Materials," *Cent. Eur. J. Energ. Mater.*, Vol. 7, № 2, pp. 115–129, 2010.
- Weir, C., M.L. Pantoya and M.A. Daniels "The role of aluminum particle size in electrostatic ignition sensitivity of composite energetic materials," *Combust. Flame.*, Vol. 160, № 10, pp. 2279–2281, 2013.

8. Kelly, D.G. et al. "Formation of Additive-Containing Nanothermites and Modifications to their Friction Sensitivity," *J. Energ. Mater.*, Vol. 35, № 3, pp. 331–345, 2016.

9. Steelman, R. et al. "Desensitizing nano powders to electrostatic discharge ignition," *J. Electrostat.*, Vol. 76, pp. 102–107, 2015.

10. Yan, N. et al. "Iron oxide/aluminum/graphene energetic nanocomposites synthesized by atomic layer deposition: Enhanced energy release and reduced electrostatic ignition hazard," *Appl. Surf.*, Vol. 408, pp. 51–59, 2017.

11. Thiruvengadathan, R. et al. "Enhanced Combustion Characteristics of Bismuth Trioxide-Aluminum Nanocomposites Prepared through Graphene Oxide Directed Self-Assembly," *Propellants, Explos. Pyrotech.*, Vol. 40, № 5, pp. 729–734, 2015.

12. Bach, A. et al. "Modulation of the Reactivity of a  $WO_3/Al$  Energetic Material with Graphitized Carbon Black as Additive," *J. Energ. Mater.*, Vol. 33, № 4, pp. 260–276, 2015.

13. Gibot, P. et al. "Safer and Performing Energetic Materials Based on Polyaniline-Doped Nanocomposites," *J. Energ. Mater.*, Vol. 35, № 2, pp. 136–147, 2016.

14. Foley, T. et al. "Development of nanothermite composites with variable electrostatic discharge ignition thresholds," *Propellants, Explos. Pyrotech.*, Vol. 32, № 6, pp. 431–434, 2007.

15. Gordeev, V.V., M.V. Kazutin, and N.V. Kozyrev "Effect of additives on CuO/Al nanothermite properties," *J. Phys. Conf. Ser.*, Vol. 894, pp. 012116, 2017.

16. Dai, J. et al. "Facile formation of nitrocellulose-coated Al/ $Bi_2O_3$  nanothermites with excellent energy output and improved electrostatic discharge safety," *Mater. Des.*, Vol. 143, pp. 93–103, 2018.

17. Qiao, Z. et al. "Fast deflagration to detonation transition of energetic material based on a quasi-core/shell structured nanothermite composite," *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 107, pp. 113–119, 2015.

18. Gordeev, V.V., M.V. Kazutin, and N.V. Kozyrev "Effect of nitrocellulose and 1-methyl-3-nitro-1,2,4-triazole on properties of CuO/Al and  $Bi_2O_3/Al$  nanothermites," *J. Phys. Conf. Ser.*, Vol. 1666, pp. 012014, 2020.

19. Гордеев В.В. Исследование влияния производных нитротриазола на взрывчатые свойства нанотермита CuO/Al / В.В. Гордеев, М.В. Казутин, Н.В. Козырев // Южно-сибирский научный вестник. - 2020. - № 6 (34). - С. 28–33.

20. Гордеев В.В. Исследование взрывчатых параметров нанотермитной композиции  $MoO_3/Al/1Me-3H$  в зависимости от рецептурных факторов / В.В. Гордеев, М.В. Казутин, Н.В. Козырев // Южно-сибирский научный вестник. - 2020. - № 6 (34). - С. 183–188.

21. Sukhanov G.T. and A.Y. Lukin "Reaction of 3-nitro-1,2,4-triazole derivatives with alkylating agents. 1. Alkylation in the presence of alkali," *Chem. Heterocycl. Compd.*, Vol. 41, № 7, pp. 861–865, 2005.

22. Sukhanova, A. G., G.V. Sakovich and G.T. Sukhanov "Reactions of 3-nitro-1,2,4-triazoles with alkylating agents. 6\*. Alkylation of a neutral heterocycle by alcohols in acid media\*," *Chem. Heterocycl. Compd.*, Vol. 44, № 11, pp. 1368–1373, 2008.

23. Белов Г.В. Термодинамическое моделирование: методы, алгоритмы, программы [Текст] / Г.В. Белов. - Научный ми. М., 2002. - 184 с.

24. Переход горения конденсированных систем во взрыв [Текст] / Беляев А.Ф. [и др.], под ред. П.Ф. Похил. - М.: Наука, 1973. - 292 с.

25. Храповский В.Е. О механизме конвективного горения пористых систем / В.Е. Храповский, А.А. Сулимов // Физика горения и взрыва. - 1988. - Т. 2. - С. 39–44.

Гордеев Владимир Вячеславович – младший научный сотрудник лаборатории № 4, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), тел. (3854) 30-18-66, e-mail:gordeev.vladimir92@yandex.ru

Казутин Максим Владимирович – к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории № 4, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской

академии наук (ИПХЭТ СО РАН), тел. (3854) 30-14-33,  
e-mail: iphet@rambler.ru.

Козырев Николай Владимирович – д.т.н., заведующий  
лабораторией № 4, Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт проблем химико-энергетических  
технологий Сибирского отделения Российской академии наук  
(ИПХЭТ СО РАН), тел. (3854) 30-58-05, e-mail: kozurev@ipcet.ru.

# EFFECT OF 1Me-3H ADDITIVE ON THE EXPLOSIVE FORCE NANOTHERMITE SYSTEMS $\text{SnO}_2/\text{Al}$ AND $\text{WO}_3/\text{Al}$

V.V. Gordeev, M.V. Kazutin, N.V. Kozyrev

*Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies SB RAS, Biysk*

Nanothermites are considered as promising energy-saturated materials for the creation of pyrotechnic products of a wide range, due to their ability to burn in thin layers, microgram quantities. However, due to the high sensitivity of nanothermites to electric spark and friction, their use is very difficult, and therefore the search for additives that reduce sensitivity, but retain acceptable parameters of explosive characteristics of nanothermite compositions is relevant. As such additives, it is advisable to highly use enthalpy substances characterized by low sensitivity. One of these substances is 1-methyl-3-nitro-1,2,4-triazole (1Me-3H). The paper presents the results of a study of the explosion force (F) of nanothermite systems based on tin oxide and aluminum  $\text{SnO}_2/\text{Al}$ , tungsten oxide and aluminum  $\text{WO}_3/\text{Al}$  depending on the content of 1Me-3H. Several compositions of different prescription configuration (I and II) were studied: in the configuration, I - the ratio of components in the nanothermite composition corresponded to the maximum calculated heat of explosion (Q) at a given content of 1Me-3H; II - the ratio of the components of the base nanothermite pair remains unchanged in triple mixtures. In the  $\text{SnO}_2/\text{Al}/1\text{Me-3H}$  system, the extreme nature of the dependence of the explosion force F on the concentration of 1Me-3H was revealed, while the maximum values of F were observed at an additive content of 10% for both prescription configuration: I - F = 163%; II - F = 160%. For the  $\text{WO}_3/\text{Al}/1\text{Me-3H}$  system of both considered compounding arrangements, a monotonous decrease in the explosion force with an increase in the content is observed 1Me-3H: with an additive content of 15%, the composition loses explosive properties (F = 0%). The nanothermite system  $\text{SnO}_2/\text{Al}/1\text{Me-3H}$ , as well as the previously studied  $\text{CuO}/\text{Al}/1\text{Me-3H}$ ,  $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}/1\text{Me-3H}$ ,  $\text{MoO}_3/\text{Al}/\text{Me-3H}$ , exhibits an extreme dependence of the explosion force F on the content of 1Me-3H, confirming the previously accepted provisions on the mechanism of reaction interaction in nanothermite compositions with organic additives, whereas the composition  $\text{WO}_3/\text{Al}/1\text{Me-3H}$ , apparently, has a different combustion mechanism from the accepted one, requiring additional research.

*Index terms: nanothermite, explosion force, prescription configuration.*

## REFERENCES

1. Zhou, X. et al. "Influence of Al/CuO reactive multilayer films additives on exploding foil initiator," *J. Appl. Phys.*, Vol. 110, № 9, pp. 094505, 2011.
2. Zhu, P. et al. "Energetic igniters realized by integrating Al/CuO reactive multilayer films with Cr films," *J. Appl. Phys.*, Vol. 110, № 7, pp. 074513, 2011.
3. Ru, C. et al. "Superior performance of a MEMS-based solid propellant microthruster (SPM) array with nanothermites," *Microsyst. Technol.*, Vol. 23, № 8, pp. 3161–3174, 2017.
4. Staley, C.S. et al. "Fast-Impulse Nanothermite Solid-Propellant Miniaturized Thrusters," *J. Propuls. Power.*, Vol. 29, № 6, pp. 1400–1409, 2013.
5. Apperson, S.J. et al. "Characterization of Nanothermite Material for Solid-Fuel Microthruster Applications," *J. Propuls. Power.*, Vol. 25, № 5, pp. 1086–1091, 2009.
6. Piercey, D.G. and T.M. Klapötke "Nanoscale Aluminum - Metal Oxide (Thermite) Reactions for Application in Energetic Materials," *Cent. Eur. J. Energ. Mater.*, Vol. 7, № 2, pp. 115–129, 2010.
7. Weir, C., M.L. Pantoya and M.A. Daniels "The role of aluminum particle size in electrostatic ignition sensitivity of composite energetic materials," *Combust. Flame.*, Vol. 160, № 10, pp. 2279–2281, 2013.
8. Kelly, D.G. et al. "Formation of Additive-Containing Nanothermites and Modifications to their Friction Sensitivity," *J. Energ. Mater.*, Vol. 35, № 3, pp. 331–345, 2016.
9. Steelman, R. et al. "Desensitizing nano powders to electrostatic discharge ignition," *J. Electrostat.*, Vol. 76, pp. 102–107, 2015.
10. Yan, N. et al. "Iron oxide/aluminum/graphene energetic nanocomposites synthesized by atomic layer deposition: Enhanced energy release and reduced electrostatic ignition hazard," *Appl. Surf.*, Vol. 408, pp. 51–59, 2017.
11. Thiruvengadathan, R. et al. "Enhanced Combustion Characteristics of Bismuth Trioxide-Aluminum Nanocomposites Prepared through Graphene Oxide Directed Self-Assembly," *Propellants, Explos. Pyrotech.*, Vol. 40, № 5, pp. 729–734, 2015.
12. Bach, A. et al. "Modulation of the Reactivity of a  $\text{WO}_3/\text{Al}$  Energetic Material with Graphitized Carbon Black as Additive," *J. Energ. Mater.*, Vol. 33, № 4, pp. 260–276, 2015.
13. Gibot, P. et al. "Safer and Performing Energetic Materials Based on Polyaniline-Doped Nanocomposites," *J. Energ. Mater.*, Vol. 35, № 2, pp. 136–147, 2016.
14. Foley, T. et al. "Development of nanothermite composites with variable electrostatic discharge ignition thresholds," *Propellants, Explos. Pyrotech.*, Vol. 32, № 6, pp. 431–434, 2007.
15. Gordeev, V.V., M.V. Kazutin, and N.V. Kozyrev "Effect of additives on CuO/Al nanothermite properties," *J. Phys. Conf. Ser.*, Vol. 894, pp. 012116, 2017.
16. Dai, J. et al. "Facile formation of nitrocellulose-coated Al/ $\text{Bi}_2\text{O}_3$  nanothermites with excellent energy output and improved electrostatic discharge safety," *Mater. Des.*, Vol. 143, pp. 93–103, 2018.
17. Qiao, Z. et al. "Fast deflagration to detonation transition of energetic material based on a quasi-core/shell structured nanothermite composite," *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 107, pp. 113–119, 2015.
18. Gordeev, V.V., M.V. Kazutin, and N.V. Kozyrev "Effect of nitrocellulose and 1-methyl-3-nitro-1,2,4-triazole on properties of CuO/Al and  $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}$  nanothermites," *J. Phys. Conf. Ser.*, Vol. 1666, pp. 012014, 2020.
19. Gordeev V.V. Effect of 3-nitro-1,2,4-triazole derivatives on combustion performance of CuO/Al / V.V. Gordeev, M.V. Kazutin, N.V. Kozyrev // South-Siberian Scientific Bulletin. - 2020. - № 6 (34). - P. 28–33.

20. Gordeev V.V. Study combustion performance nanothermite composition  $\text{MoO}_3/\text{Al}/1\text{Me}-3\text{H}$  on the prescription factors / V.V. Gordeev, M.V. Kazutin, N.V. Kozyrev // South-Siberian Scientific Bulletin.- 2020. № 6 (34). - P. 183–188.
21. Sukhanov G.T. and A.Y. Lukin "Reaction of 3-nitro-1,2,4-triazole derivatives with alkylating agents. 1. Alkylation in the presence of alkali," *Chem. Heterocycl. Compd.*, Vol. 41, № 7, pp. 861–865, 2005.
22. Sukhanova, A. G., G.V. Sakovich and G.T. Sukhanov "Reactions of 3-nitro-1,2,4-triazoles with alkylating agents. 6\*. Alkylation of a neutral heterocycle by alcohols in acid media\*," *Chem. Heterocycl. Compd.*, Vol. 44, № 11, pp. 1368-1373, 2008.
23. Belov G.V. 2002 Termodinamicheskoye modelirovaniye: metody, algoritmy, programmy [Thermodynamics modeling: methods, algorithms, programs] (Moscow: Nauchnyi Mir) p. 184.
24. Belyaev A.F. et al., ed. Pohl P.F. 1973 Perekhod goreniya kondensirovannyh sistem vo vzryv [Combustion transition of condensed systems to explosion] (Moscow: Nauka) p. 292.
25. Hrapovskiy V.E. On the mechanism of convective combustion of porous systems / V.E. Hrapovskiy, A.A. Sulimov // Combustion, Explosion, and Shock Waves. - 1988. - Vol. 2. - P. 39–44.

*Gordeev Vladimir Vyacheslavovich: Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), research scientist at the Laboratory of Physicochemical Bases of Energetic Condensed Systems, 659322 Biysk, Altai krai, ul. Socialisticheskaya 1. E-mail: gordeev.vladimir92@yandex.ru. Work phone: 8-(3854)-30-18-66.*

*Kazutin Maxim Vladimirovich: Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), candidate of engineering sciences, senior research scientist at the Laboratory of Physicochemical Bases of Energetic Condensed Systems, 659322 Biysk, Altai krai, ul. Socialisticheskaya 1. E-mail: iphet@rambler.ru Work phone: 8-(3854)-30-14-33.*

*Kozyrev Nicolay Vladimirovich: Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), doctor of engineering sciences, head of the Laboratory of Physicochemical Bases of Energetic Condensed Systems, 659322 Biysk, Altai krai, ul. Socialisticheskaya 1. E-mail: kozyrev@ipcet.ru Work phone: 8-(3854)-30-58-05.*