

05;12

Инициирование взрыва фуразанотетразиндиоксида сильноточным электронным пучком

© В.И. Олешко¹, В.Е. Зарко², В.В. Лысык¹,
В.П. Ципилев¹, П.И. Калмыков³

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск

² Институт химической кинетики и горения СО РАН, Новосибирск

³ Федеральный научно-производственный центр „Алтай“, Бийск
E-mail: oleshko@tpu.ru

Поступило в Редакцию 12 января 2014 г.

Представлены результаты исследования физико-химических процессов, развивающихся в фуразанотетразиндиоксиде при облучении сильноточным электронным пучком с плотностью энергии, варьируемой в диапазоне 0.05–0.3 J/cm². Измерены спектрально-кинетические характеристики импульсной катодолюминесценции, определены пороги механического разрушения и взрывного разложения образцов. Установлено сильное влияние плотности энергии электронного пучка на кинетику процесса взрывного превращения (индукционный период и длительность взрывного свечения). Обнаружен размерный эффект инициирования взрыва.

Эндотермическое высокочувствительное вещество фуразанотетразиндиоксид (ФТДО, C₂N₆O₃) является относительно новым и одним из наиболее мощных взрывчатых веществ (ВВ) [1,2]. Исследование свойств этого соединения представляет не только фундаментальный, но и практический интерес, связанный с перспективностью создания высокоэнергетических композиций и мощных смесевых взрывчатых составов на основе ФТДО [3,4]. В [4] приведены результаты экспериментального исследования процессов инициирования ФТДО при механических воздействиях. Что касается чувствительности этого соединения к другим видам энергетических импульсов, в частности к облучению сильноточным электронным пучком (СЭП), то такие сведения в литературе отсутствуют.

В данном сообщении представлены результаты экспериментального исследования физико-химических процессов, развивающихся в ФТДО при облучении СЭП с плотностью энергии, варьируемой в диапазоне $0.05\text{--}0.3\text{ J/cm}^2$. Целью работы являлось изучение закономерностей и особенностей инициирования взрывного превращения ФТДО мощным электронным пучком и получение информации о механизме инициирования.

Источником возбуждения являлся импульсный высокопоточный ускоритель электронов со средней энергией электронов $\sim 250\text{ keV}$ и длительностью импульса тока на полувысоте $\sim 12\text{ ns}$. Плотность энергии в импульсе варьировалась с помощью коллиматоров, которые устанавливались за анодом вакуумного диода, и изменением расстояния от выходной фольги ускорителя до образца. Объектом исследований служил порошкообразный ФТДО в виде таблеток толщиной $200\text{--}400\text{ }\mu\text{m}$ и диаметром 3 mm , полученных прессованием под давлением 10^9 Pa . Исследуемый образец крепился на подложке, расположенной за анодом ускорителя, и возбуждался электронным пучком через алюминиевую фольгу толщиной $30\text{ }\mu\text{m}$, отделяющую вакуумный диод высокопоточного электронного ускорителя от атмосферы. Максимальная плотность энергии электронного пучка, выведенного в атмосферу, составляла 0.3 J/cm^2 . С увеличением расстояния от фольги до образца плотность энергии СЭП уменьшалась до 0.05 J/cm^2 . Спектральные и кинетические характеристики катодолюминесценции и взрывного свечения ФТДО регистрировались с помощью измерительной системы на основе монохроматора МДР-23, ФЭУ-84 и осциллографа DPO 3034, связанного с компьютером. Временное разрешение системы регистрации составляло 15 ns . Измерения проводились при температуре 300 K .

Исследование влияния плотности энергии СЭП на физико-химические процессы, развивающиеся в тонких ($d \leq 0.85R_e$, где R_e — экстраполированный пробег электронов с энергией 250 keV) образцах ФТДО, позволило выявить следующие закономерности. Установлено, что облучение образцов электронным пучком с $H \leq 0.06\text{ J/cm}^2$ сопровождается импульсной катодолюминесценцией. Спектр катодолюминесценции ФТДО состоит из одной широкой полосы излучения, максимум которой соответствует энергии 2.14 eV (ширина на полувысоте FWHM $\sim 0.36\text{ eV}$). Длительность импульса катодолюминесценции не превышает временное разрешение оптического спектрометра $\tau \leq 15\text{ ns}$. При $H \geq 0.1\text{ J/cm}^2$ наблюдается разрушение образца на отдельные осколки.

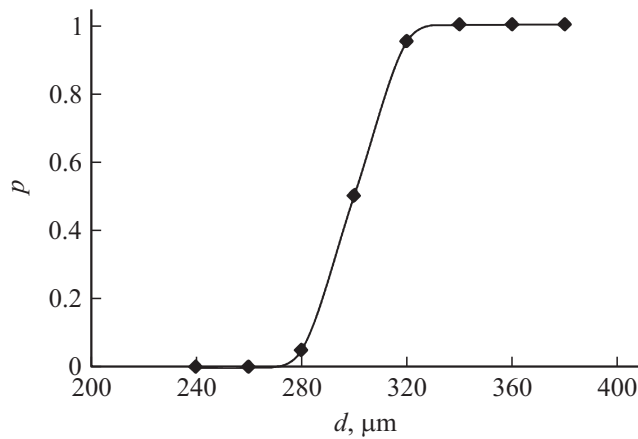


Рис. 1. Зависимость вероятности взрыва от толщины образца.

Увеличение плотности энергии СЭП в диапазоне $0.1 \leq H \leq 0.3 \text{ J/cm}^2$ приводит к уменьшению размеров осколков до нескольких десятков микрон. Взрывное разложение образцов ФТДО при данных условиях эксперимента не обнаружено (на осциллограммах свечения наблюдается только один безынерционный пик свечения, соответствующий импульсу катодоллюминесценции образца).

В процессе исследования разрушения образцов ФТДО обнаружен размерный эффект, который заключался в увеличении вероятности инициирования взрыва с ростом толщины образца (рис. 1). Видно, что при $H = 0.25 \text{ J/cm}^2$ образцы ФТДО, имеющие толщину $d \geq 320 \mu\text{m}$, взрываются с вероятностью $p \approx 1$, в то время как образцы толщиной $d \leq 280 \mu\text{m}$ не взрывались ($p = 0$). Следует отметить, что критическая толщина таблетки ФТДО, при которой вероятность взрыва $p = 1$, соответствует расчетному значению экстраполированного пробега $d^* \approx R_e \approx 320 \mu\text{m}$ электронов пучка со средней (эффективной) энергией, равной 250 keV при плотности образца $\rho = 1.84 \text{ g/cm}^3$. Определен порог инициирования (H^*) прессованных таблеток ФТДО, имеющих толщину $d \geq 320 \mu\text{m}$ ($H^* = 0.09 \text{ J/cm}^2$). Установлено, что при $H \geq 0.09 \text{ J/cm}^2$ наблюдается взрывное разложение образца. Кинетика свечения ФТДО в надпороговом режиме облучения СЭП представляет собой два следующих друг

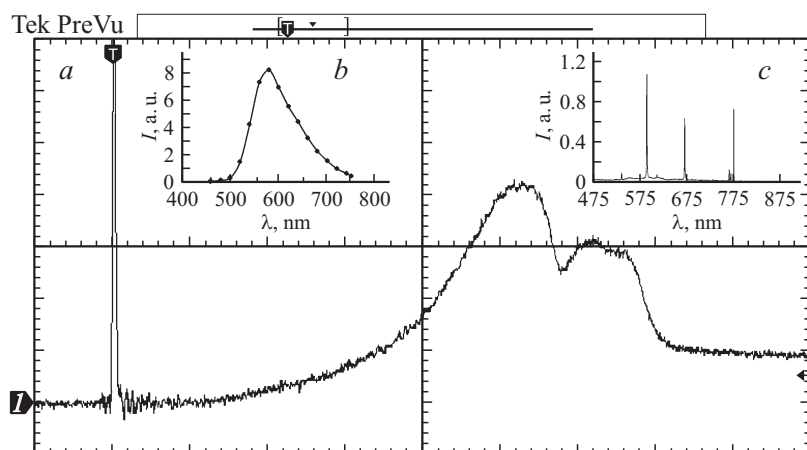


Рис. 2. Кинетика взрывного свечения ФТДО при инициировании электронным пучком ($H = 0.15 \text{ J/cm}^2$). *a* — кинетика свечения, *b* — спектр катодолуминесценции, *c* — спектр свечения продуктов взрывного разложения.

за другим импульсом свечения (рис. 2). Первый, короткий пик свечения соответствует катодолуминесценции образца и является реперным, фиксирующим момент облучения образца. Второй, длинновременной пик представляет собой свечение продуктов взрывного разложения. На врезках к рис. 2 приведены спектры первого и второго импульсов свечения. При $H^* = 0.09 \text{ J/cm}^2$ свечение продуктов взрыва возникает с задержкой $t \approx 1200 \text{ ns}$ относительно момента облучения. Увеличение H в диапазоне $0.09 \leq H \leq 0.25 \text{ J/cm}^2$ приводит к монотонному уменьшению индукционного периода с 1200 до 30 ns при одновременном сокращении длительности свечения продуктов взрывного разложения. Зависимость длительности индукционного периода от плотности энергии СЭП приведена на рис. 3. Эмиссионные спектры продуктов взрывного превращения ФТДО измерены нами в работе [5] и свидетельствуют о наличии в спектрах взрыва ФТДО примесей щелочных металлов (Na, Li, K), которые входят в состав образцов при их изготовлении, и элементов подложки (Al, Cu), на которой крепились образцы перед взрывом.

Анализируя процесс инициирования взрывного превращения ФТДО под действием СЭП, следует отметить, что приближенная оценка по

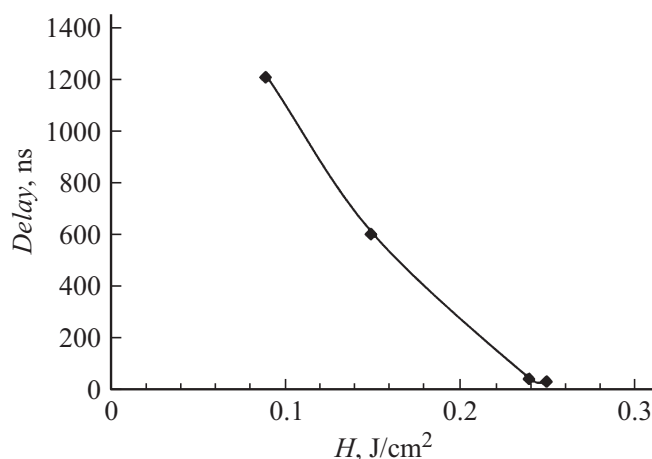


Рис. 3. Зависимость длительности индукционного периода от плотности энергии СЭП.

нагреву вещества дает очень низкие значения температуры возбуждаемого слоя. Если учесть, что удельная теплоемкость ФТДО $c \sim 1 \text{ J/g} \cdot \text{K}$, а поглощение электронов происходит в слое $320 \mu\text{m}$, то среднее по возбуждаемому объему повышение температуры при $H^* = 0.09 \text{ J/cm}^2$ и гомогенном распределении ионизационных потерь энергии СЭП составит величину около 2 К, что противоречит тепловому механизму инициирования. Возникает примерно та же ситуация, что и при электронно-пучковом инициировании азидов тяжелых металлов (АТМ), где пороги взрывного превращения находятся в области $\sim 0.1 \text{ J/cm}^2$ [6,7]. В [6–9] для описания поведения АТМ и тетранитрата пентаэритрита (ТЭН) при облучении СЭП предложена электроразрядная модель создания „горячих точек“ в объеме ВВ при локализации энергии, выделившейся в результате электрического пробоя. О том, что электроразрядная модель инициирования ВВ реализуется и в ФТДО, свидетельствует размерный эффект. Качественное объяснение размерного эффекта и низкорогового инициирования ФТДО электронным пучком заключается в следующем. Уменьшение толщины образца с 320 до $280 \mu\text{m}$ не влияет на максимум пространственного распределения температуры в облучаемом образце, но уменьшает величину инжектированного в образец

отрицательного объемного заряда, так как часть высокоэнергетических электронов пучка проходит через образец и не поглощается. Вследствие этого напряженность электрического поля, связанного с отрицательным объемным зарядом СЭП, уменьшается и становится недостаточной для развития электрического пробоя, а следовательно, и для инициирования взрыва ФТДО.

Таким образом, в результате исследований установлено, что порог инициирования ФТДО электронным пучком близок по величине к порогу электрического пробоя, развивающегося в инертных диэлектриках [10,11] и взрывчатых веществах (АТМ и ТЭНе) [6–9] при облучении СЭП. Полученные данные свидетельствуют о том, что основной причиной инициирования взрыва ФТДО является электрический пробой, индуцированный СЭП в зоне торможения электронного пучка.

Список литературы

- [1] Пепекин В.И., Матюшин Ю.Н., Губина Т.В. // Химическая физика. 2011. Т. 30. № 2. С. 42–45.
- [2] Калмыков П.И., Зарко В.Е., Сидельников А.А. и др. // Журнал прикладной химии. 2011. Т. 84. В. 2. С. 252.
- [3] Зарко В.Е., Симоненко В.Н., Калмыков П.И. и др. // Физика горения и взрыва. 2009. Т. 45. № 6. С. 131–134.
- [4] Теселкин В.А. // Физика горения и взрыва. 2009. Т. 45. № 5. С. 140–142.
- [5] Олешко В.И., Зарко В.Е., Лысык В.В. и др. // Забабахинские научные чтения: сборник материалов XII Международной конференции. 2–6 июня 2014 г. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2014. С. 106.
- [6] Олешко В.И., Damamme G., Malys D., Lisiцын В.М. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 20. С. 55–61.
- [7] Oleshko V., Lisitsyna L., Damamme G., Malys D., Lisitsyn V. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2010. V. 268. N 19. P. 3265–3268.
- [8] Олешко В.И., Корепанов В.И., Лисицын В.М., Ципилев В.П. // Забабахинские научные чтения: Сборник материалов IX Международной конференции. 10–14 сентября 2007 г. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2007. С. 58–59.
- [9] Олешко В.И., Лисицын В.М., Скрипин А.С., Ципилев В.П. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. № 9. С. 37–43.
- [10] Олешко В.И., Штанько В.Ф. // ФТТ. 1987. Т. 29. В. 2. С. 320–324.
- [11] Олешко В.И. Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Томск, 2009. С. 317.