

05:07:10

## **Электрический пробой и взрывное разложение монокристаллов тетранитрата пентаэритрита при облучении электронным пучком**

© В.И. Олешко, В.М. Лисицын, А.С. Скрипин, В.П. Ципилев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
E-mail: oleshko@tpu.ru

Поступило в Редакцию 23 ноября 2011 г.

Представлены результаты экспериментального исследования свечения, разрушения и взрывного разложения монокристаллов тэна при облучении сильноточным электронным пучком. Обнаружены кристаллографически ориентированные электрические (стримерные) разряды, которые формируются в зоне пробега электронного пучка в кристалле в широком диапазоне плотностей энергии  $0.1-75.0 \text{ J/cm}^2$ . Определены пороги электрического пробоя, разрушения и взрывного разложения монокристаллов. Показано, что в отличие от прессованных порошков в монокристаллах тэна реализуется неполный взрыв с разбросом основной массы не прореагировавшего вещества.

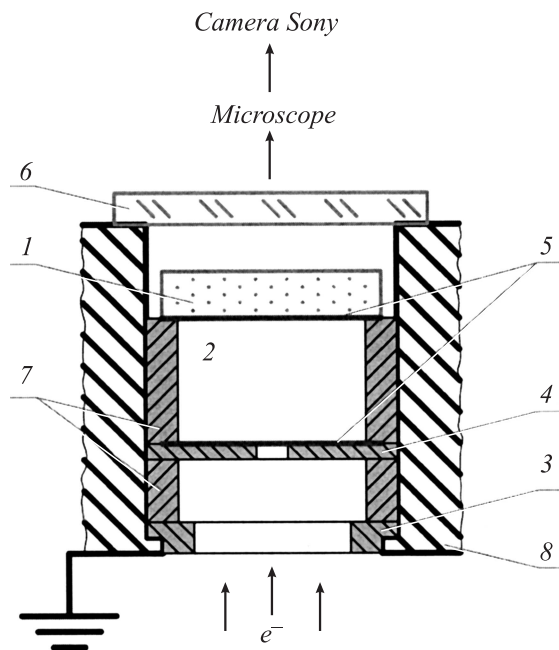
В [1] впервые осуществлено инициирование детонации твердотельного бризантного взрывчатого вещества (ВВ) тетранитрата пентаэритрита (тэна) сильноточным электронным пучком (СЭП). Было показано, что электронный пучок, в отличие от лазерного излучения, позволяет реализовать инициирование детонации прессованных образцов тэна с открытой поверхностью, т.е. без подавления разлета вещества из зоны воздействия специальной оболочкой. Причины такого сильного различия процессов, развивающихся в тэне при этих способах инициирования, не установлены. К настоящему времени предложено два альтернативных механизма электронно-пучкового инициирования взрывного разложения тэна — электроразрядный [2,3] и экситонный [4,5]. Согласно первому, взрыв развивается из „горячих точек“, роль которых выполняют каналы электрического пробоя. Основанием для этой гипотезы являются косвенные экспериментальные результаты, полученные при исследовании физико-химических процессов,

развивающихся в энергетических материалах [2,3,6,7], и данные по электрическому пробую пассивных (не энергетических) диэлектриков под действием СЭП [8–10]. Второй ключевую роль отводит электронно-дырочным возбуждениям (свободным электронам, дыркам и экситонам), образующимся в тэна при его облучении. Очевидно, что для обоснования „электроразрядной“ гипотезы необходимы доказательства существования электрических разрядов в объеме тэна при допороговых уровнях возбуждения.

Цель настоящей работы — получить прямые экспериментальные доказательства развития электрического пробоя в монокристаллах тэна при облучении сильноточным электронным пучком и определить порог инициирования электрических разрядов.

Решение данной задачи сдерживается несколькими причинами: необходимостью получения информации за один импульс возбуждения, сложностью разделения различных по физической природе свечений (катодолуминесценция, электрические разряды, продукты реакции химического разложения) при их фотоэлектрической регистрации и недостаточным пространственным разрешением диагностической аппаратуры, применяемой в [2,4] для исследования взрывного свечения энергетических материалов.

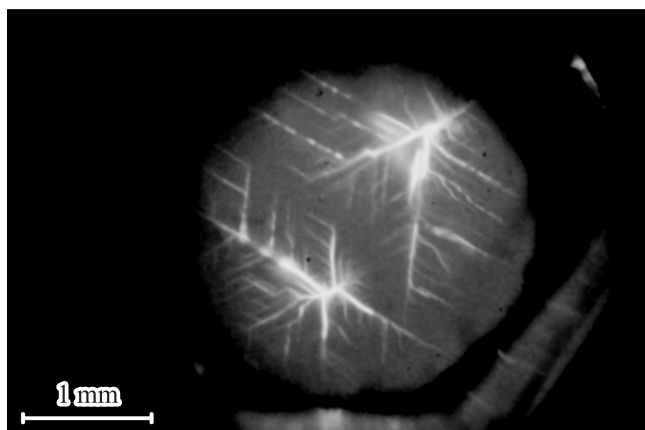
Для выделения свечения электрических разрядов на фоне катодолуминесценции и взрывного свечения применялась схема эксперимента, приведенная на рис. 1. Исследуемый образец 1 с поперечными размерами 3–7 мм и толщиной 1.5–2.0 мм помещался в вакуумную камеру 2, совмещенную с вакуумным диодом электронного ускорителя и возбуждался электронным пучком через отверстие в аноде 3 и диафрагму 4. Для локализации электрического поля в зоне торможения СЭП на облучаемую поверхность тэна наносилась алюминиевая фольга 5 толщиной 10 мкм. Источником электронов служил наносекундный ускоритель электронов, представляющий собой высоковольтный генератор импульсных напряжений ГИН-600 (максимальная энергия электронов 450 keV, максимальный ток 3 кА, длительность импульса тока на полувывоте 15 ns), собранный по схеме Аркадьева–Маркса и нагруженный на вакуумный диод [11]. Плотность энергии СЭП варьировалась в диапазоне (0.05–75) J/cm<sup>2</sup> путем изменения величины катод-анодного зазора, применением диафрагм, изменением расстояния от анода до образца и определялась радиационно-химическим методом [12]. Высокие значения  $H$  достигались в режиме самофокусировки СЭП,



**Рис. 1.** Схема облучения тэна электронным пучком: 1 — исследуемый образец (тэн), 2 — вакуумная камера, 3 — анод, 4 — диафрагма-коллиматор, 5 — алюминиевая фольга  $10\ \mu\text{m}$ , 6 — окно вакуумной камеры, 7 — металлические кольца-прокладки, 8 — корпус ускорителя.

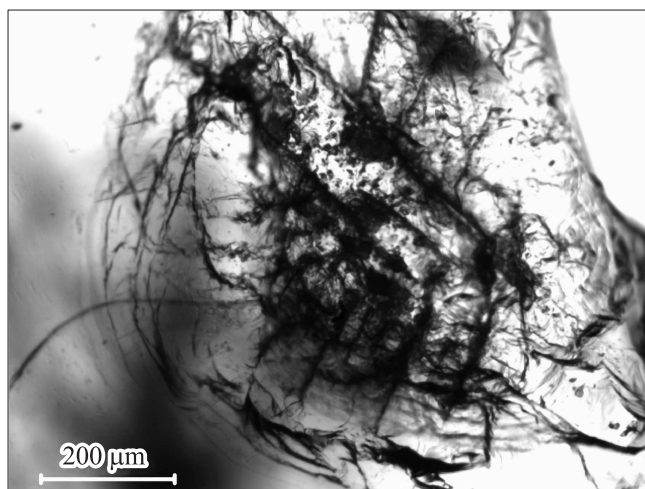
определялись по формированию эрозионных пятен на поверхности металлов, отличающихся температурой сублимации [10,13] и рассчитывались по формулам, приведенным в [14]. Свечения, возникающие при возбуждении тэна электронным пучком, фотографировали через окно вакуумной камеры 6 цифровым фотоаппаратом SONY  $\alpha$ 500 через микроскоп МБС-10.

Обнаружено, что при достижении пороговой плотности энергии электронного пучка  $H_{th} \sim 0.1\ \text{J}/\text{cm}^2$  в области торможения СЭП в кристалле на фоне катодoluminesценции формируются яркие, кристаллографически ориентированные каналы электрического пробоя. Стримеры расходятся под углом  $60^\circ$  друг к другу и образуют с гранями



**Рис. 2.** Интегральная фотография свечения стримерных разрядов, инициируемых электронным пучком в монокристалле тэна при  $H_{th} \sim 0.5 \text{ J/cm}^2$ .

кристалла углы  $90^\circ$  и  $30^\circ$  (рис. 2). В отдельных экспериментах стримерные разряды развивались вне области облучения и „втягивались“ в зону торможения электронного пучка. При облучении тэна электронным пучком с плотностью энергии ниже пороговой электрические разряды в монокристалле не инициируются, а наблюдается только импульсная катодоллюминесценция образца. Формирование стримерных разрядов при достижении  $H_{th}$  сопровождается разрушением облучаемой поверхности тэна. Изучение морфологии разрушения монокристаллов на микровизоре проходящего света  $\mu\text{Vizo-101}$  позволило выделить на фоне макротрещин кристаллографически ориентированные остаточные каналы электрического пробоя, расположенные в области пробега электронного пучка (рис. 3). При этом разрядная фигура, полученная в разрушении, повторяет геометрию разрядной фигуры в свечении. Совпадение порогов электрического пробоя и разрушения монокристаллов тэна при облучении СЭП свидетельствует об электроразрядном механизме разрушения образцов. Установлено, что электрические разряды инициируются в тэне в диапазоне плотностей энергии СЭП от  $0.1$  до  $75.0 \text{ J/cm}^2$ . При плотности энергии  $H \geq 0.8 \text{ J/cm}^2$  происходит неполный (частичный) взрыв монокристалла. При этом невзорвавшаяся часть



**Рис. 3.** Фотографии разрушения монокристалла тэна после моноимпульсного облучения электронным пучком с плотностью энергии  $H_{th} \sim 0.1 \text{ J/cm}^2$ .

образца (основная его масса) разбрасывается в экспериментальной камере. О том, что произошел взрыв монокристалла, свидетельствуют следующие факты: наличие вспышки свечения плазменной струи при ее разлете и взаимодействии с преградой, разрушение тонкой ( $10 \mu\text{m}$ ) алюминиевой фольги, на которую устанавливался образец, и резкое увеличение давления в вакуумной камере. С увеличением  $H$  в диапазоне  $0.1 - 75.0 \text{ J/cm}^2$  количество каналов пробоя, их размеры и яркость свечения возрастают. Одновременно увеличивается количество прореагировавшего ВВ и уменьшаются размеры разлетающихся фрагментов монокристалла от миллиметров до нескольких микрон. Анализ цветных фотографий свидетельствует о том, что спектры свечений, возникающих на различных стадиях развития взрыва, существенно различаются. „Белые“ (плазменные) электрические разряды регистрируются на фоне „голубой“ катодолюминесценции кристалла. Продукты взрыва при разлете и ударе о преграды излучают преимущественно в „красной“ области спектра.

Сравнение результатов экспериментов по электронно-пучковому инициированию монокристаллов и прессованных порошков тэна сви-

детельствует о существенном различии развития химической реакции в этих объектах. Если в прессованных порошках тэна при  $H \sim 60 \text{ J/cm}^2$  наблюдается детонация и полное химическое превращение ВВ, то в монокристаллах даже при максимально возможной в эксперименте плотности энергии электронного пучка ( $H \approx 75 \text{ J/cm}^2$ ) основная масса образца диспергируется и разбрасывается в экспериментальной камере. Сравнение кинетики взрывного свечения прессованных образцов и монокристаллов тэна свидетельствует о более высокой скорости развития химической реакции в прессованных образцах. Так, полное химическое превращение прессованного образца с характерными размерами  $\sim 3 \times 3 \times 2 \text{ mm}$  происходит за  $\sim 120 \text{ ns}$  [1]. Длительность взрывного свечения монокристаллов тэна с близкими размерами на полувысоте составляет  $\sim 400 \text{ ns}$  [4]. Физические причины, влияющие на скорость химического разложения и полноту химического превращения монокристаллов тэна, недостаточно изучены. Можно предположить, что одна из них — формирование трещин в образце. Согласно [15], образование трещин в монокристаллах ВВ можно трактовать как появление свободного пространства вблизи очагов химического разложения. Это приводит к газодинамической разгрузке очага и невозможности инициирования детонации. Дополнительным фактором, приводящим к срыву детонации в монокристаллах тэна, по-видимому, является недостаточно высокая дисперсионность частиц, образующихся в процессе взрывного разложения образца.

Таким образом, впервые установлено, что при облучении монокристаллов тэна сильноточным электронным пучком с плотностью энергии  $H_{th} \geq 0.1 \text{ J/cm}^2$  в зоне облучения формируются кристаллографически ориентированные стримерные разряды. Полученные результаты подтверждают электроразрядную модель инициирования тэна электронным пучком, которая описана в [3,6,7]. Микровзрывы, возникающие в зонах локализации электрических разрядов, приводят к диспергированию монокристалла, газодинамической разгрузке продуктов испарения и химического разложения тэна в свободное пространство и, как следствие, к разбросу основной массы непрореагировавшего вещества. Самораспространение химической реакции за пределы области пробега электронного пучка (детонация всей массы ВВ) наблюдается только для предварительно диспергированных образцов тэна (прессованных порошков) при достижении плотности энергии СЭП порогового значения [1].

Работа выполнена в рамках госконтракта № П517 по ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы.

## Список литературы

- [1] *Корепанов В.И., Лисицын В.М., Олешко В.И., Ципилев В.П.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 16. С. 23–28.
- [2] *Олешко В.И., Корепанов В.И., Лисицын В.М., Ципилев В.П.* // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43. № 5. С. 87–89.
- [3] *Олешко В.И., Корепанов В.И., Лисицын В.М., Ципилев В.П.* // Забавинские научные чтения: сборник материалов IX Международной конференции. 10–14 сентября 2007 г. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ. С. 58–59.
- [4] *Адуев Б.П., Белокуров Г.М., Гречин С.С., Тупицин Е.В.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 15. С. 91–95.
- [5] *Kuklja M.M., Stefanovich E.V., Kunz A.B.* // J. Chem. Phys. 2000. V. 112. N 7. P. 3417–3423.
- [6] *Олешко В.И., Damamme G., Malys D., Лисицын 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] *Лисицын В.М., Олешко В.И.* // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. В. 1. С. 15–18.
- [9] *Олешко В.И., Штанько В.Ф.* // ФТТ. 1987. Т. 29. В. 2. С. 320–324.
- [10] *Олешко В.И.* Дис... докт. физ.-мат. наук. Томск, 2009. С. 317.
- [11] *Ковальчук Б.М., Месяц Г.А., Семин Б.М., Шпак В.Г.* // ПТЭ. 1981. № 4. С. 15–18.
- [12] *Сериков Л.В., Юрмазова Т.А., Шиян Л.Н.* Способ дозиметрии ионизирующего излучения / А.с. № 1544030. 1989.
- [13] *Олешко В.И., Лисицын В.М., Корепанов В.И.* // Изв. вузов. Физика. 2009. Т. 52. № 8/2. С. 537–541.
- [14] *Месяц Г.А., Проскуровский Д.И.* Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984. 256 с.
- [15] *Чернай А.В.* // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32. № 1. С. 13–19.