

05;07;10

## Инициирование детонации ТЭНа мощным электронным пучком

© В.И. Корепанов, В.М. Лисицын, В.И. Олешко, В.П. Ципилев

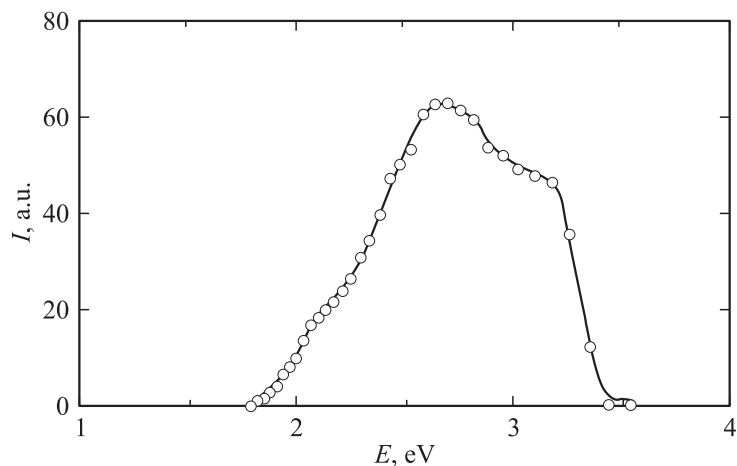
Томский политехнический университет  
E-mail: korepan@ephd.tpu.ru

Поступило в Редакцию 25 февраля 2003 г.

Изложены первые результаты исследования физико-химических процессов, развивающихся в тетранитрате пентаэритрита (ТЭН) под действием импульсного электронного пучка в широком диапазоне изменения плотности мощности. Изучены спектрально-кинетические характеристики импульсной катодолюминесценции, кинетика взрывного свечения, определены пороги механического разрушения и взрывного разложения ТЭНа.

Сильноточные электронные пучки (СЭП) наносекундной длительности в сочетании с методом импульсной оптической спектроскопии с временным разрешением нашли широкое применение для исследования и контроля параметров твердых тел различных классов, в том числе и взрывчатых веществ (ВВ) [1–2]. К настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал о физических процессах в иницирующих ВВ, которые развиваются при воздействии импульсных электронных пучков. Такого рода исследования во вторичных ВВ, к которым относится ТЭН, не проводились. Известно [3], что воздействие лазерного импульса на свободную поверхность ТЭНа не приводит к иницированию взрыва даже при максимально достижимых значениях интенсивностей, так как развитию химической реакции препятствует испарение и разлет вещества из зоны возбуждения. Учитывая важность знания кинетических процессов в выявлении механизма иницирования взрыва, установление возможности и условий применения для этих целей СЭП дает экспериментаторам мощный инструмент для исследования.

В настоящей работе приводятся результаты исследования кинетики физико-химических процессов, развивающихся в ТЭНе при облучении электронным пучком с плотностью потока мощности в диапазоне  $1 \cdot 10^6 \leq P \leq 5 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$ . Источником возбуждения являлся импульс-



**Рис. 1.** Спектр импульсной катодолуминесценции ТЭНа при 300 К.

ный сильноточный ускоритель электронов со средней энергией электронов в спектре 250 keV и длительностью импульса тока на полувысоте  $\sim 25$  ns. Плотность мощности СЭП в импульсе варьировалась геометрией вакуумного диода [4] и расстоянием от образца до анода ускорителя. Образцы в форме дисков с размерами  $\varnothing 4 \times 1.8$  mm изготавливались из порошка ТЭНа дисперсностью  $S = 6000$  cm<sup>2</sup>/g, спрессованного под давлением  $10^9$  Pa. Возбуждение образцов производилось в вакуумной камере при давлении остаточных газов  $10^{-2}$  Pa и температуре 300 К. Измерения спектрально-кинетических характеристик импульсной катодолуминесценции ТЭНа проводилось на импульсном спектрометре с временным и спектральным разрешением  $\sim 10$  ns и  $\sim 0.008$  eV соответственно.

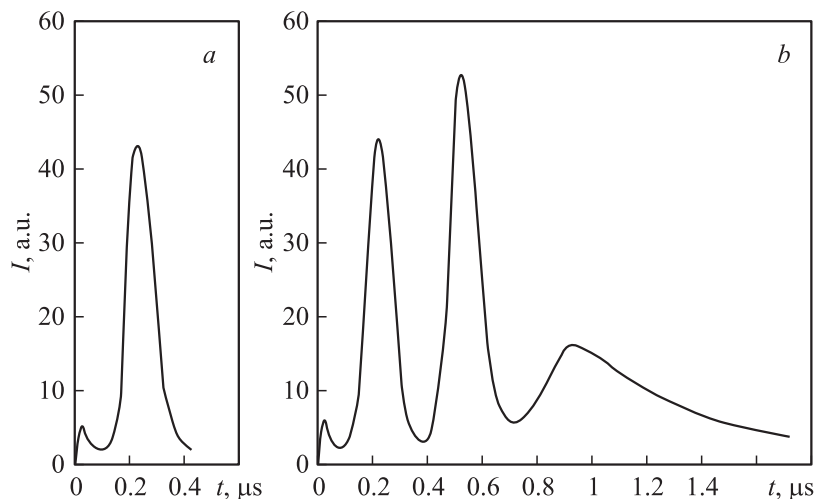
Импульсная катодолуминесценция измерялась при плотности электронного возбуждения не выше порога механического разрушения образцов. Типичный спектр свечения ТЭНа, построенный с учетом спектральной чувствительности оптического тракта, измеренный при  $P \sim 3 \cdot 10^6$  W/cm<sup>2</sup> в момент достижения максимального значения вспышки свечения, приведен на рис. 1. Видно, что спектр не является элементарным и состоит из суперпозиции, по крайней мере,

трех полос излучения. Время затухания свечения во всем спектральном диапазоне не превышает длительности импульса электронного пучка.

При более высоких уровнях возбуждения, когда  $P \geq 5 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$ , нами обнаружено образование на облучаемой поверхности ТЭНа откольных разрушений. Многократное воздействие СЭП приводит к формированию кратера, диаметр которого равен диаметру электронного пучка. При увеличении плотности мощности и количества импульсов облучения глубина кратера растет, а форма приближается к конической. Установлено, что механическое разрушение ТЭНа не является следствием протекания химической реакции разложения образца. Об этом свидетельствует не только отсутствие эффектов, характерных для взрывного разложения ВВ (световой и звуковой сигналы, резкое уменьшение давления в вакуумной камере), но и отсутствие следов оплавления и испарения поверхности кратера вплоть до  $P \sim 1 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$ , а также близость порога разрушения ТЭНа к порогам разрушения других, инертных материалов [5].

Возбуждение импульсным электронным пучком при  $P > 4 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$  (энергия  $\sim 1 \text{ J}$ ) вызывает детонацию ТЭНа. Такая высокая плотность потока мощности достигалась в режиме самофокусировки СЭП. Порог инициирования ВВ определялся экспериментально по формированию эрозионных пятен на поверхности металлов, отличающихся температурой сублимации, и рассчитывался по формулам, приведенным в [6]. По нашим оценкам объемная плотность энергии в очаге инициирования ТЭНа, определенная при значениях  $\rho = 1.5 \text{ g/cm}^3$  и  $c = 1.67 \text{ J(g} \cdot \text{K)}$ , достигает величины  $\sim 2200 \text{ J/cm}^3$ , температура приповерхностной области  $\sim 1100 \text{ K}$ , а амплитуда ударной волны  $\sim (5-7) \cdot 10^8 \text{ Pa}$ . Таким образом, при инициировании ТЭНа импульсным электронным пучком температура и давление в очаге инициирования по порядку величины сравнимы со значением этих же параметров при других способах возбуждения [7]. Эти оценки свидетельствуют в пользу теплового механизма электронно-пучкового инициирования ТЭНа.

Для изучения кинетики взрывного свечения (ВС) и разлета продуктов взрыва ТЭНа использовалась следующая схема эксперимента. Образец располагался на аноде, в котором имелось отверстие диаметром  $1.5 \text{ mm}$  для прохождения электронного пучка. Увеличенное в два раза изображение образца и прилегающей к нему зоны разлета



**Рис. 2.** Кинетика взрывного свечения ТЭНа при инициировании взрыва электронным пучком: *a* — при свободном разлете продуктов взрыва, *b* — при наличии двух преград.

продуктов взрывного разложения проецировалось линзой на входную щель монохроматора МДР-23. Взрывное свечение регистрировалось при длине волны 600 nm с помощью ФЭУ-118 и осциллографа С8-14. Для определения скорости разлета продуктов взрыва использовались преграды, роль которых выполняли проволочки диаметром 1 mm, установленные на расстояниях 2 и 4 mm от тыльной (по отношению к пучку) поверхности образца. Типичные осциллограммы взрывного свечения ТЭНа при свободном разлете плазменной струи и при наличии двух преград приведены на рис. 2, *a, b* соответственно. Первый пик на осциллограммах возникает в результате воздействия на ФЭУ импульса тормозного излучения электронного ускорителя и является реперным, фиксирующим начало облучения образца. Второй представляет взрывное свечение, возникающее с задержкой  $\sim 100$  ns относительно момента воздействия СЭП на образец. Длительность импульса ВС на полувысоте ( $\sim 120$  ns) и его амплитуда меняются не более чем на 15% при одинаковых условиях возбуждения ТЭНа. По длительности

импульса ВС и размерам образца мы оценили среднюю скорость химического разложения ТЭНа, которая в условиях эксперимента составила  $1 \cdot 10^4$  m/s. Однако эти измерения носят приближенный характер, так как в расчетные оценки входит глубина зоны энерговыделения пучка, определить которую точно не представляется возможным. Высокая скорость химического разложения свидетельствует о развитии быстрой детонации ТЭНа. Начальные стадии развития химической реакции в твердом теле (медленное горение и детонация с малой скоростью  $\sim 1 \cdot 10^3$  m/s) нами не обнаружены. По-видимому, это связано с тем, что время развития вышеупомянутых процессов сравнимо с временем выброса вещества из зоны энерговыделения. Предварительные измерения (несколько значений на отдельных длинах волн) свидетельствуют о том, что спектр ВС преимущественно сплошной. Третий и четвертый пики свечения на осциллограмме (рис. 2, *b*) возникают при ударе образующейся при взрывном разложении ТЭНа плазменной струи о преграды, в результате чего часть кинетической энергии плазмы преобразуется в энергию оптического излучения. Скорость разлета продуктов взрывного разложения, рассчитанная из осциллограммы свечения, составила  $5 \cdot 10^3$  m/s.

Таким образом, электронный пучок, в отличие от лазерного излучения, позволяет инициировать процесс взрывного разложения при открытой поверхности ТЭНа. Наиболее вероятное объяснение развития процесса детонации может быть представлено следующим образом. Энергия электронного пучка практически полностью идет на нагревание объема ВВ, ограниченного диаметром СЭП и глубиной пробега. При достижении плотности мощности СЭП, достаточной для испарения ТЭНа, формируется ударная волна, амплитуда которой быстро нарастает при увеличении плотности потока мощности электронного пучка. При достижении критического давления ударной волны возникает быстрая детонация. После взрыва в области расположения образца возникает плотный сгусток низкотемпературной плазмы, расширяющейся со сверхзвуковой скоростью в окружающее пространство. Возможность надежного инициирования детонации ТЭНа электронным пучком, без подавления разлета вещества из зоны воздействия, по-видимому, определяется объемным характером энерговыделения СЭП, что позволяет сформировать ударную волну критической амплитуды при значительно меньших энергетических затратах по сравнению с лазерным импульсом.

## Список литературы

- [1] *Корепанов В.И., Лисицын В.М., Олешко В.И.* // Изв. вузов. Физика. 2000. Т. 43. № 3. С. 22–30.
- [2] *Захаров Ю.А., Алукер Э.Д., Адуев Б.П.* и др. Предвзрывные явления в азидах тяжелых металлов. М.: ЦЭИ „Химмаш“, 2002. 115 с.
- [3] *Бриш А.А., Галлеев И.А., Зайцев Б.Н.* // Физ. горения и взрыва. 1966. Т. 2. № 3. С. 132–133.
- [4] *Корепанов В.И., Лисицын В.М., Олешко В.И.* // Патент № 2157988. 2000.
- [5] *Олешко В.И., Штанько В.Ф.* // ФТТ. 1987. Т. 29. В. 2. С. 320–324.
- [6] *Месяц Г.А., Проскуровский Д.И.* Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984. 256 с.
- [7] *Таржанов В.И., Зинченко А.Д., Сдобнов В.И.* и др. // Физ. горения и взрыва. 1996. Т. 32. № 4. С. 113–119.