

**МОРФОЛОГИЯ РАЗРУШЕНИЙ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТЕ ПРИ
ОБЛУЧЕНИИ СИЛЬНОТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В РЕЖИМЕ ФИЛАМЕНТАЦИИ
И САМОФОКУСИРОВКИ**

В.В. Нгуен, В.И. Олешко

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н., В.И. Олешко

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: nguyenvutpu@gmail.com

**THE MORPHOLOGY OF DAMAGE IN POLYMETHYL METHACRYLATE WHEN IRRADIATED
WITH A HIGH-CURRENT ELECTRON BEAM IN THE FILAMENTATED AND SELF-FOCUSED
MODE**

V.V. Nguyen, V.I. Oleshko

Scientific Supervisor: Prof., Dr. V.I. Oleshko

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: nguyenvutpu@gmail.com

***Abstract.** The morphology of the damage formed in PMMA upon irradiation with a high-current electron beam ($E_{ave} \sim 250$ keV, $\tau_{1/2} = (2 - 12)$ ns) in the filamented and self-focused mode was studied. In the localization zones of the filament in the near-surface region of the samples at a depth of 40 - 80 μ m, micro-fractures of a circular and more complex shape were found, the diameters of which vary from 1 to 50 μ m. The destruction is interconnected by electric breakdown channels. It is assumed that this type of destruction is formed as a result of irradiation of the polymer with high density electron microbeams, which are formed in the vacuum diode of a pulsed high-current electron accelerator.*

Введение. Исследование физико-химических процессов, развивающихся в конденсированных средах при облучении мощными электронными пучками, представляет интерес для различных научных и прикладных направлений – радиационной физики твердого тела, космического материаловедения, физики высоких плотностей энергии и физики взрыва [1-5]. Известно, что при облучении полиметилметакрилата (ПММА) сильноточным электронным пучком (СЭП) с плотностью энергии $H \approx (1-5) H^*$ (где H^* - пороговая плотность энергии СЭП для инициирования электрического пробоя в зоне торможения пучка, равная ~ 5 Дж/см³) основным видом разрушений являются каналы электрического пробоя (КЭП). Пространственная структура, спектральные и кинетические характеристики свечения электрических разрядов, инициируемых в зоне торможения электронного пучка в ПММА, и в других диэлектриках хорошо изучены. Что касается воздействия самосфокусированного сильноточного электронного пучка с плотностью энергии $H \approx (10^3 - 10^4)$ Дж/см³ на ПММА, то такие исследования ранее не проводились. Стимулом для проведения таких исследований является общенаучный интерес к двум проблемам – необходимостью изучения поведения твердых тел при высоких плотностях энергии и получением новых данных о физической природе таких явлений как филаментация и самофокусировка СЭП в вакуумных диодах со взрывоэмиссионным катодом.

Цель настоящей работы – исследование морфологии разрушений, образующихся в ПММА при облучении СЭП в режиме его филаментации и самофокусировки в вакуумном диоде импульсного сильноточного ускорителя электронов с генератором ГИН-600.

Экспериментальная часть. Эксперименты были проведены на импульсном ускорителе электронов с генератором ГИН-600, к которому подключался вакуумный диод. Максимальная энергия электронов в спектре пучка достигала 400 кэВ, длительность импульса тока СЭП на полувысоте $\tau_{1/2}$ изменялась от 2 до 12 нс. Вакуумный диод (рис. 1) был образован трубчатым катодом и плоским анодом, роль которого выполняла алюминиевая фольга, толщиной 10 мкм. В экспериментах использовались трубчатые цилиндрические катоды с диаметрами 3 - 8 мм. Аспектное отношение $g = R/d$ (где R – радиус катода, d – межэлектродный зазор) варьировалось в диапазоне 0,7 - 1. Явления филаментации и самофокусировки СЭП исследовались по морфологии объемных разрушений в ПММА («автографам» электронного пучка) с помощью оптической микроскопии с пространственным разрешением ~ 1 мкм. На облучаемую поверхность ПММА наносилась алюминиевая фольга, толщиной 10 мкм. Толщина образцов составляла 2 мм. Плотность тока филаментированного СЭП, а, следовательно, и интенсивность разрушений, образующихся в области взаимодействия филаментированного СЭП с ПММА, изменялась путем варьирования геометрии вакуумного диода (R и d) и длительности импульса тока СЭП.

Результаты. Фигура разрушения, образующаяся в ПММА после однократного импульса облучения при $d = 2,5$ мм и $R = 4$ мм, $\tau_{1/2} = 2$ нс филаментированным СЭП приведена на рис. 2. Видно, что в результате однократного импульса облучения на поверхности исследуемой мишени образуется разрушение в виде многолучевой звезды с центральным пятном самофокусировки, подобно «автографам», образующимся на поверхности металлов [4].

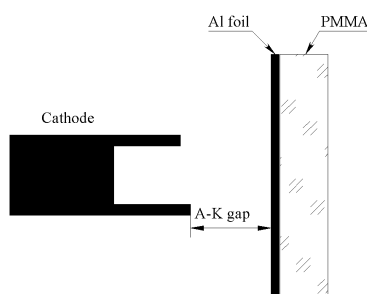


Рис. 1. Конфигурация вакуумного диода импульсного сильноточного ускорителя электронов с генератором ГИН-600

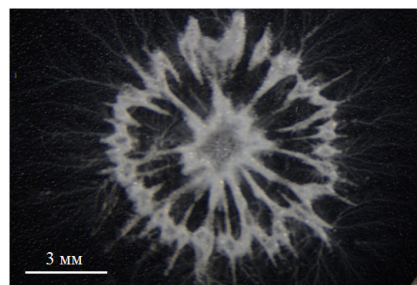


Рис. 2. Фигура разрушения в ПММА, образующаяся после облучения одиночным импульсом в режиме филаментации и самофокусировки СЭП

Если в металлах «автограф» филаментированного СЭП регистрируются только при плотности тока, достаточной для испарения облучаемой мишени, то для ПММА можно подобрать такие условия облучения, при которых испарение поверхности мишени отсутствует, а объемные остаточные разрушения («лучи») и центральное пятно самофокусировки регистрируются. Микроскопические исследования показали, что и в этих условиях нитевидные разрушения («лучи») в ПММА непрозрачны при их наблюдении в проходящем свете. Варьируя условия облучения (R , d и $\tau_{1/2}$) впервые удалось зарегистрировать тонкую структуру объемных микроразрушений, формирующих «луч», определить их форму, размеры и глубину залегания от облучаемой поверхности.

На рис. 3 а - в, приведены фотографии микроразрушений, образующихся в ПММА на различных расстояниях от облучаемой поверхности.

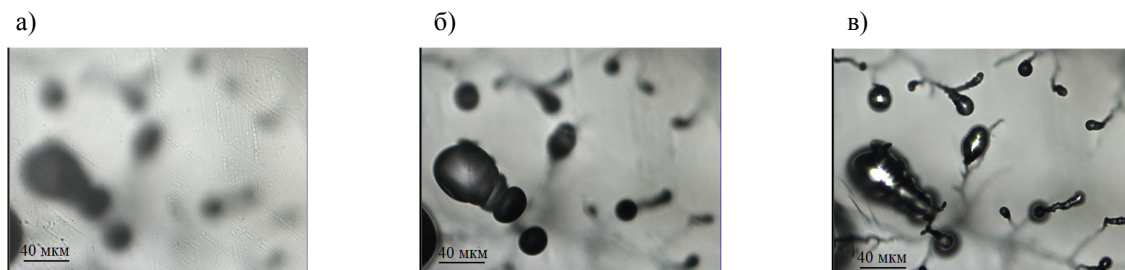


Рис. 3. Микрофотографии разрушений, образующихся в зоне взаимодействия филаментированного СЭП с ПММА: а – облучаемая поверхность; б, в) разрушения, регистрируемые на различной глубине от облучаемой поверхности: б – 40 мкм; в – 75 мкм

Анализ многочисленных фотографий микроразрушений, формируемых филаментированным СЭП в ПММА позволил сделать предположение о том, что они образуются в результате действия двух механизмов - термоудара и электрического пробоя.

Заключение. При облучении ПММА электронным пучком в режиме филаментации и самофокусировки в области взаимодействия филаментированного электронного пучка с облучаемой мишенью на глубине 40 - 80 мкм обнаружены микроразрушения круглой и более сложной формы, диаметры которых изменяются от 1 до 50 мкм. Фигуры объединены каналами электрического пробоя. Предполагается, что данный вид разрушений образуется в результате облучения полимера электронными микропучками высокой плотности, которые формируются в вакуумном диоде импульсного сильноточного ускорителя электронов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Высокоэнергетическая электроника твердого тела / под ред. Д.И. Вайсбурда. – Новосибирск: Наука, 1982. – 227 с.
2. Акишин А.И. Космическое материаловедение. Методическое и учебное пособие. – М: НИИЯФ МГУ, 2007. – 209 с.
3. Тарумов Э.Э. Получение и фокусировка сильноточных релятивистских электронных пучков в диодах // Генерация и фокусировка сильноточных релятивистских электронных пучков / под ред. Л.И. Рудакова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – С. 122–181.
4. Олешко В.И., Тарасенко В.Ф., Бураченко А.Г., Nguyen V.V. Филаментация и самофокусировка электронных пучков в вакуумных и газовых диодах // Письма в ЖТФ. – 2019. – Т. 45., № 7. – С. 3–7.
5. Олешко В.И., Зарко В.Е., Лысык В.В. и др. Инициирование взрыва фуразанотетразиндиоксида сильноточным электронным пучком // Письма в ЖТФ. – 2015. Т. 41, №. 11. – С. 10–15.