

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ ПРОПЛАВА В КВАРЦЕВОМ СТЕКЛЕ ОТ ПАРАМЕТРОВ  
ОСТРОСФОКУСИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА**

А.А. Зенин, А.С. Климов, А.Н. Николаенко

Научный руководитель: профессор, д.т.н. Е.М. Окс

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40, 634050

E-mail: [zenin1988@gmail.com](mailto:zenin1988@gmail.com)

**ON THE INFLUENCE OF THE ELECTRON BEAM PARAMETERS ON THE SHAPE OF THE  
MELTING IN QUARTZ GLASS**

A.A. Zenin, A.S. Klimov, A.N. Nikolaenko

Scientific Supervisor: Prof., Dr. E.M. Oks

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Lenin str., 40, 634050

E-mail: [zenin1988@gmail.com](mailto:zenin1988@gmail.com)

***Abstract.** In this paper, we present the results the dependence of the melting shape in quartz glass on the parameters of an electron beam. Studies have shown no significant effect of electron energy on the form of melting.*

**Введение.** В настоящее время широко развивается создание новых инструментов обработки конструкционных материалов. В этой области большой интерес уделяется источникам передачи энергии, позволяющий осуществлять с помощью локального нагрева обработку, резку, сварку и модификацию различных изделий, из проводящих и не проводящих материалов. К данной тематике относится электронно-лучевая сварка, позволяющая с помощью электронного луча получать сварные соединения различных материалов. Для достижения высокого качества сварного шва встает сложная техническая задача по формированию заданной геометрии проплава.

Плазменные источники электронов имеют широкое применение в современной вакуумной технике [1]. Эти источники, функционирующие не только в высоком вакууме, но и в так называемом форвакууме, основаны на эмиссии электронов из плазмы [2]. Переход в форвакуумную область давлений расширяет диапазон возможностей плазменных источников, и позволяет производить обработку диэлектрических материалов без применения дополнительных средств нейтрализации заряда, накапливаемого на обрабатываемой поверхности [3].

Для ряда технологических задач повышенный интерес проявляется к кварцевым стеклам. Минимальный показатель преломления, а, следовательно, лучшее светопропускание, высокая термическая стойкость наряду с диэлектрическими свойствами делают кварцевые стекла незаменимыми в промышленности. Особенностью кварцевого стекла является его высокая температура плавления, и трещиностойкость при его механической обработке. В работе [4] представлены результаты исследований состава газовой атмосферы при электронно-лучевой обработке кварцевого стекла, но при этом не проводились исследования формы проплава при электронно-лучевой обработке кварцевого стекла. Цель

настоящей работы является определение формы проплавлений в цилиндрических образцах кварцевого стекла в зависимости от времени электронно-лучевого облучения и энергии электронов пучка.

**Методика проведения эксперимента.** Эксперименты проводились с применением форвакуумного плазменного источника электронов на основе тлеющего разряда с полым катодом. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1,а. Более подробно принцип работы источника описан в работах [3–4]. Также на рис. 1,б представлен график зависимости глубины проплавления от времени при различном ускоряющем напряжении.

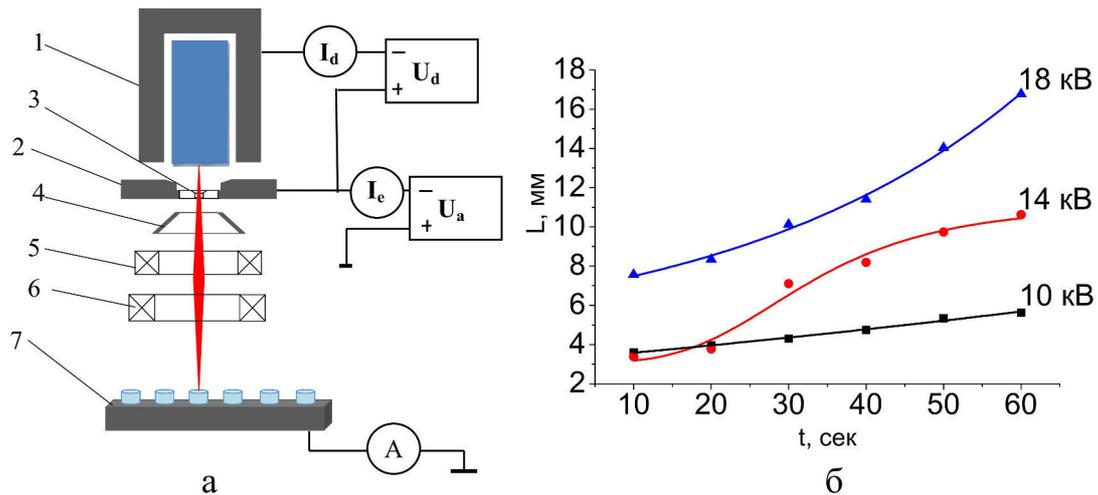


Рис. 1. Схема форвакуумного плазменного источника для измерения формы проплава (а) и график зависимости глубины проплавления от времени при различном ускоряющем напряжении (б): 1 – полый катод, 2 – анод, 3 – перфорированный электрод, 4 – ускоряющий электрод, 5 – фокусирующая система, 6 – система отклонения, 7 – каретка с образцами.

Для исследования формы проплава использовались кварцевые стеклянные стержни диаметром 10 мм и длиной 30 мм. Стержни устанавливались на подвижную каретку 7, которая перемещалась перпендикулярно электронному пучку. Время воздействия электронного пучка на образец задавалось от 10 до 60 секунд. При этом ускоряющее напряжение было постоянным и составляло 10, 14 и 18 кВ, соответственно, для разных серий эксперимента. Ток пучка в экспериментах оставался постоянным и равным 10 мА. Диаметр пучка устанавливался минимально возможным (~ 1 мм) и определялся параметрами фокусирующей системы. В качестве рабочего газа использовался гелий, давление 30 Па.

**Результаты работы и их обсуждение.** Экспериментальные зависимости глубины проплава от времени для различных ускоряющих напряжений представлены на рис. 1,б.

Как видно из представленного графика, зависимости глубины проплава от времени при различном ускоряющем напряжении имеют монотонный рост с увеличением времени. При этом увеличение ускоряющего напряжения, а, следовательно, и плотности мощности в пучке, приводит к значительному росту глубины проплава. Это объяснимо тем, что при увеличении ускоряющего напряжения, увеличивается и плотность мощности электронного пучка, приходящегося на обрабатываемую поверхность, которая составляет  $1,2 \cdot 10^4$ ,  $1,7 \cdot 10^4$ ,  $2,3 \cdot 10^4$  Вт/кв.см. А так как кварцевое стекло имеет низкую теплопроводность, то наблюдается активное испарение из ванны расплава. Справедливость

такого предположения подтверждается наличием в остаточной атмосфере монооксида и диоксида кварца, как это было показано ранее в работе [4].

Как и ожидалось, форма проплава образцов близка к «кинжальной», это видно по рис. 2. Где  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  диаметры проплава при разной глубине, а  $L$  сама глубина проплавления.

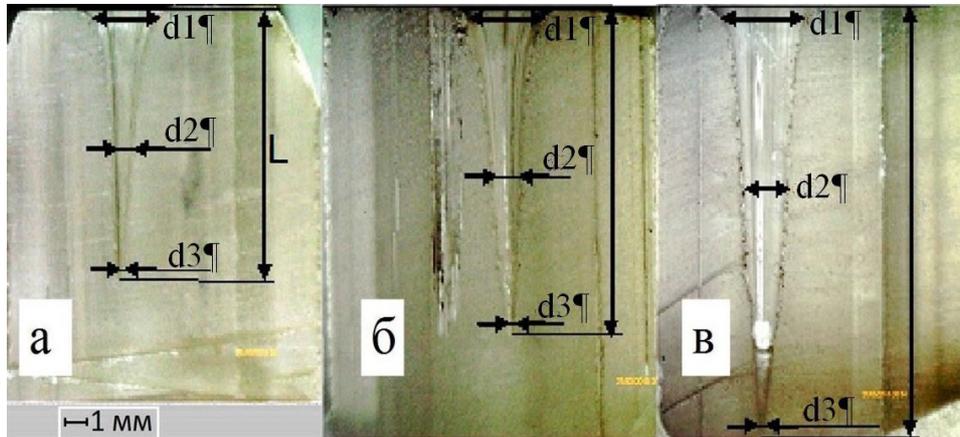


Рис. 2. Форма проплава при 50 секундном облучении: а) при 10 кВ, б) при 14 кВ, в) при 18 кВ

Как видно из рисунка диаметр проплава на различной глубине изменяется не значительно, что обусловлено гауссовым распределением плотности тока электронного пучка. Это заметно в начале сварочной ванны  $d_1$  и на средней глубине  $d_2$ , для рисунка а)  $d_1$  равен 2 мм,  $d_2$  равен 0,61 мм, для б)  $d_1$  равен 2,15 мм,  $d_2$  равен 0,77 мм, а для в)  $d_1$  равен 2,61 мм,  $d_2$  равен 1,3 мм. Для всех образцов диаметр проплава в вершине сварочной ванны  $d_3$  не значительно меняется, колеблясь в пределах от 0,2 до 0,3 мм.

**Заключение.** Изменение параметров электронно-лучевого воздействия позволяет изменять форму проплава в кварцевом стекле. При этом на глубину проплава наиболее значительное влияние оказывает продолжительность электронно-лучевого облучения, в то время как энергия электронов в основном влияет на диаметр проплава в его вершине.

Работа поддержана грантом РФФИ 16-38-60032 мол\_а\_дк.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнилов С.Ю. О параметрах электронного пучка пушки с плазменным эмиттером / С.Ю. Корнилов, Н.Г. Ремпе, А. Veniyash, N. Murray, T. Hassel, C. Ribton // Письма в ЖТФ. – 2013 – Т. 39. – № 19. – С. 1–8.
2. Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. – М.: НТЛ, 2005. – 216 с.
3. Зенин А.А. Электронно-лучевая пайка алюмооксидной керамики с металлом с применением форвакуумного плазменного источника электронов / А.А. Зенин, А.С. Климов // Доклады ТУСУРа. – 2013. – № 1 (27). – С. 10–13.
4. Зенин А.А. Состав газовой атмосферы при электронно-лучевой обработке кварцевого стекла в форвакуумном диапазоне давлений / А.А. Зенин А.А. // Известия вузов. Физика. – 2016. – Т. 59. – № 9/2. – С. 212–215.