

УДК 537.533.9

PACS: 41.75.Fr

Распределение тепловых полей при электронно-лучевой обработке кварцевого стекла плазменным источником электронов

И. Ю. Бакеев, А. А. Зенин, А. С. Климов, Е. М. Окс

В статье представлены результаты исследования распределения температурного поля в кварцевых стеклах при электронно-лучевом нагреве. Показано, что, несмотря на низкий коэффициент теплопроводности кварцевого стекла, с увеличением времени электронно-лучевого воздействия происходит прогрев всего образца, а градиент температур уменьшается. Предложена качественная модель, описывающая электронно-лучевой нагрев стыка двух кварцевых трубок, позволяющая оценить параметры области нагрева при сварке кварца. Показана принципиальная возможность электронно-лучевой сварки кварцевых трубок.

Ключевые слова: электронный пучок, форвакуум, тепловые поля, тепловизионная методика измерения, сварка стекол.

Введение

Электронный пучок благодаря высокому значению удельной мощности является уникальным инструментом для локального термического нагрева, а возможность управления положением электронного пучка и его диаметром делают электронно-лучевые технологии незаменимыми в ряде технологических операций, например, таких как сварка металлов с глубоким проплавлением [1, 2], формирование отверстий в тугоплавких материалах, термическое испарение [3–5].

Развитие плазменных источников электронов расширяет возможности электронно-лучевой обработки, позволяя обрабатывать электронным пучком не только металлы и их сплавы, но также и диэлектрические материалы [6]. Электронные пучки, распространяющиеся в диапазоне давлений 5–50 Па, могут быть применены для изготовления сварных диэлектрических изделий [7], а наличие вакуума в процессе сварки позволяет получать

чистые беспримесные швы, что особенно важно при изготовлении стеклянных частей электровакуумных приборов. При этом одним из важных критериев при термическом воздействии на хрупкие стеклянные изделия является контроль температуры поверхности в месте воздействия электронного пучка, а также величины температурных перепадов по объему изделия. Для контроля тепловых процессов при сварке, плавке, испарении материалов используют бесконтактные методы измерения температуры, осуществляемые с помощью пирометров либо тепловизоров [8].

Очевидное преимущество тепловизионного метода заключается в возможности измерения распределения температуры по поверхности изделия, в то время как пирометр позволяет получить данные о температуре изделия лишь в локальной области.

Целью настоящей работы являлось исследование с помощью тепловизионного метода распределения тепловых полей в кварцевом стекле в зависимости от режимов электронно-лучевого облучения, а также создание расчетной модели на этой основе для предопределения тепловой картины в широком диапазоне электронно-лучевого воздействия.

Методика эксперимента

Эксперименты проводились на вакуумной установке, оснащенной электронным источником, системой электропитания и диагностики. Схема установки представлена на рис. 1.

Бакеев Илья Юрьевич¹, м.н.с.

Зенин Алексей Александрович¹, с.н.с., к.т.н.

Климов Александр Сергеевич¹, с.н.с., д.т.н.

Окс Ефим Михайлович^{1,2}, зав. кафедрой, профессор, д.т.н.

¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

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

Тел. 8(905) 990-52-41. E-mail: klimov@main.tusur.ru

²Институт сильноточной электроники СО РАН.

Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3.

Статья поступила в редакцию 13 марта 2018 г.

© Бакеев И. Ю., Зенин А. А., Климов А. С., Окс Е. М., 2018

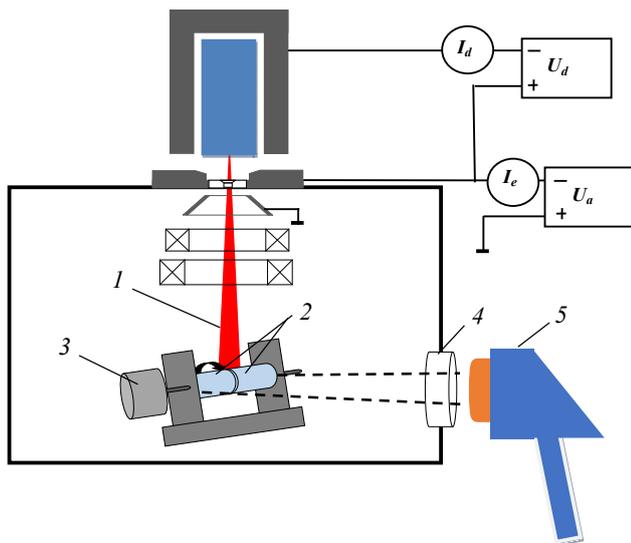


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения тепловых полей: 1 – электронный пучок, 2 – исследуемые образцы, 3 – система вращения, 4 – сапфировое стекло, 5 – тепловизор.

Исследование температурных полей при электронно-лучевом воздействии на поверхность кварцевого стекла осуществлялось бесконтактным методом с использованием тепловизора FLUKE 200Ti, позволяющим измерять температуру в диапазоне $-20 +650\text{ }^{\circ}\text{C}$ с точностью $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Электронный пучок генерировался форвакуумным плазменным источником электронов на основе разряда с полым катодом, принцип работы

и основные технические характеристики которого описаны в [6, 7, 9]. Сформированный и ускоренный пучок электронов 1 диаметром 10 мм, энергией от 4 до 10 кэВ и током 10–20 мА наводился на стык пары кварцевых трубок 2, либо в центральную область кварцевой прямоугольной пластины, располагаемой в вакуумной камере перпендикулярно оси пучка. Длина каждой трубки – 25 мм, диаметр 20 мм, толщина стенки 2 мм. Кварцевая пластинка имела размеры $50 \times 200 \times 5$ мм. Время нагрева в экспериментах составляло 5 минут. После нагрева пучок электронов выключался и образцы остывали в вакууме. Для обеспечения равномерного нагрева трубок облучение проводилось при вращении образцов. Тепловизор 5 функционировал в режиме видеосъемки с частотой 9 кадров/с. Вывод ИК-изображения из вакуумной камеры осуществлялся через сапфировое стекло 4 толщиной 10 мм. Получаемые термограммы нагреваемых электронным пучком трубок наглядно давали распределение температуры по поверхности. Все эксперименты проводились при давлении 30 Па, причем в качестве рабочего газа использовался гелий.

Результаты экспериментов и их анализ

Типичные термограммы в процессе нагрева кварцевой пластинки и трубок представлены на рис. 2.

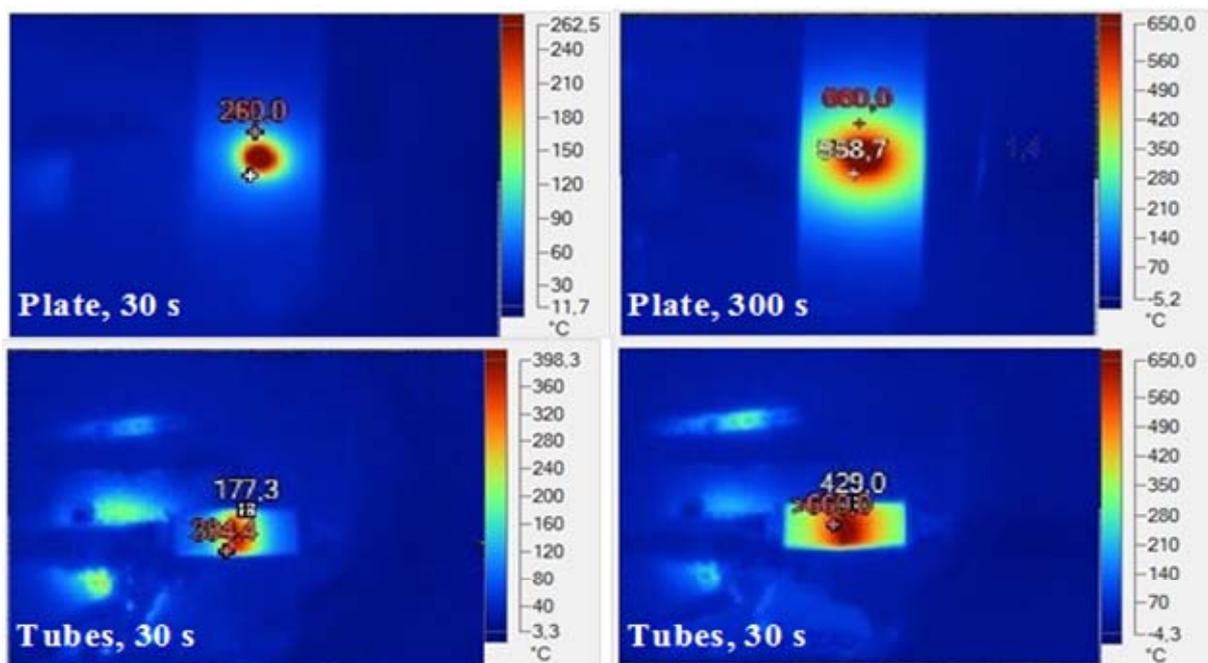


Рис. 2. Термограмма нагреваемых кварцевых деталей (вверху – пластина, внизу – трубки) в различные промежуточные времени: ускоряющее напряжение 4 кВ, ток пучка 10 мА.

На рис. 3 приведены временные зависимости температуры в процессе электронно-лучевого облучения центральной части кварцевой пластинки, а также периферийной области, расположенной на расстоянии 2,5 см от центра пластинки.

Продолжительность облучения составляла 300 с, после чего источник выключался. Отсутствие участка насыщения на экспериментальных кривых объясняется наличием держателей, через которые происходит сток тепла от облучаемого объекта.

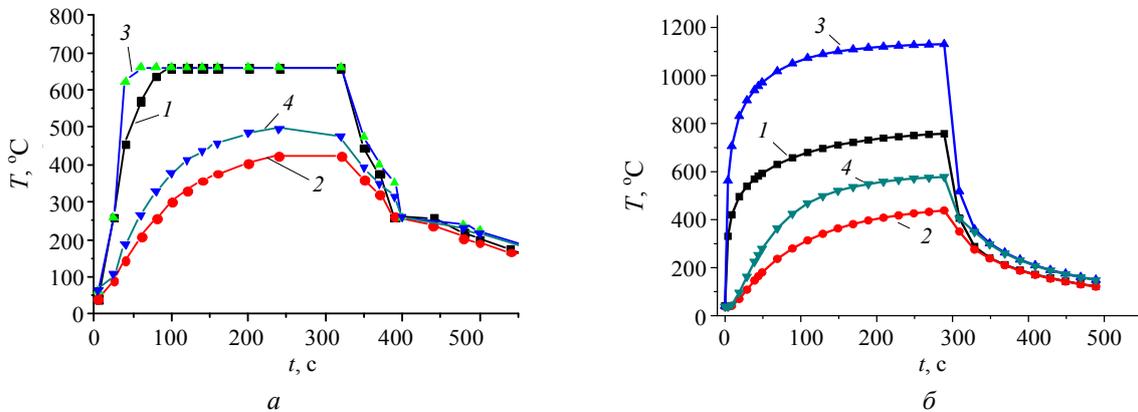


Рис. 3. Экспериментальная (а) и расчетная (б) зависимости температуры T от времени t для плоской пластины при различных ускоряющих напряжениях U : 1, 2 – $U = 4$ кВ, 3, 4 – $U = 7$ кВ; и при разных расстояниях от области электронно-лучевого облучения: 1, 3 – область стыка пластин, 2, 4 – 2,5 см от стыка. Ток пучка 20 мА.

Как и следовало ожидать, нагрев центральной области пластины происходит значительно быстрее, чем на периферии. Аналогичная ситуация наблюдается и при нагреве вращающихся кварцевых трубок. Ввиду ограничения максимальной температуры, измеряемой тепловизором (+650 °C), необходимые для осуществления процессов сварки кварцевых деталей температуры не могут быть непосредственно измерены. Однако по измеренной в эксперименте динамике распределения температуры при нагреве до небольших температур и при известных теплофизических параметрах образцов предполагаемое распределение тепловых полей в них можно оценить на основе предварительных расчетов.

Методика расчёта

Расчёт температурного поля кварцевого стекла при облучении электронным пучком осуществлялся с использованием метода конечных элементов [10]. Для этого объем кварцевого стекла разбивался равномерной сеткой по трем координатам x, y, z . Размер образованных при разбиении ячеек (шаг разбиения) составлял 0,25 мм по каждой координате. В каждой такой ячейке температура принималась одинаковой по всему объему в конкретный момент времени. Значения коэффици-

ента теплопроводности, плотность, теплоемкость, коэффициент серости для всех ячеек объема кварцевого стекла задавались одинаковыми.

Оценка температуры в кварцевом стекле осуществлялось из решения уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\lambda}{c_p \rho} \Delta T = P_h(x, y, z, t) + P_{th}(x, y, z, t),$$

где λ – коэффициент теплопроводности; c_p – коэффициент теплоемкости; ρ – плотность кварцевого стекла; $P_h(x, y, z, t)$ – плотность мощности, передаваемая электронным пучком на участок верхней грани пластины (за время облучения задавалась равной плотности мощности электронного пучка $P_h(x, y, z, t) = 4 \cdot U_a \cdot I_b / (\pi \cdot d_b^2)$); $P_{th}(x, y, z, t)$ – плотность мощности, теряемая поверхностями за счет теплового излучения $P_{th}(x, y, z, t) = \varepsilon \sigma T^4$, где ε – коэффициент серости, σ – постоянная Стефана-Больцмана.

При замене производных их разностной аппроксимацией выражение для расчета температуры ячейки с индексами i, j, k по осям x, y, z соответственно по истечении временного шага Δt , имеет вид:

$$T_{ijk}^{t+\Delta t} = T_{ijk}^t + \Delta t \left[\frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \left(\frac{T_{i-1,jk}^t + T_{i+1,jk}^t - 2T_{ijk}^t}{\Delta x} + \frac{T_{ij-1,k}^t + T_{ij+1,k}^t - 2T_{ijk}^t}{\Delta y} + \frac{T_{ijk-1}^t + T_{ijk+1}^t - 2T_{ijk}^t}{\Delta z} \right) + P_h(x, y, z, t) + P_{th}(x, y, z, t) \right],$$

где верхний индекс t – обозначение температуры в предыдущий момент времени, верхний индекс $t + \Delta t$ – значение температуры по истечении временного шага Δt .

На рис. 3, б приведены результаты расчета распределения температуры для кварцевой пластины. Некоторые различия (не более 10 %) между измеренной и расчетной температурой связаны, скорее всего, с простотой использованной модели, не учитывающей наличие держателей, через которые могут происходить потери тепла. Тем не менее, экспериментальные исследования и расчетные данные показывают, что перепад температур δT между краем трубчатых деталей и областью электронно-лучевого воздействия в начальный момент времени максимален и может достигать 500–750 °С, что отражено на рис. 4.

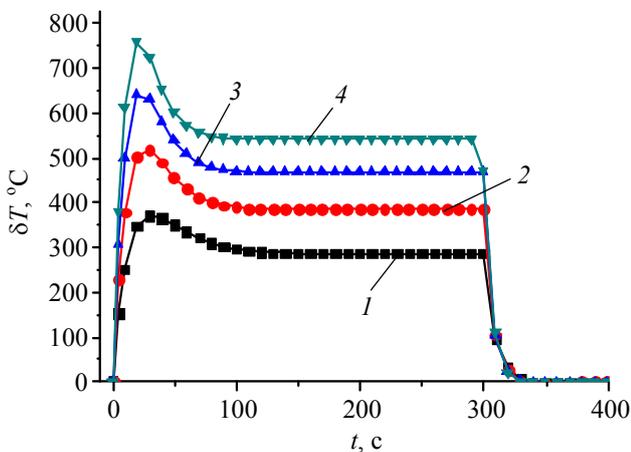


Рис. 4. Зависимости перепада температур δT от времени t для цилиндрических кварцевых трубок: кривые 1 – $U = 4$ кВ; 2 – $U = 6$ кВ; 3 – $U = 8$ кВ; 4 – $U = 10$ кВ.

Это связано с низкой теплопроводностью кварцевого стекла. При увеличении времени воздействия температура края трубок возрастает, и перепад температур уменьшается, хотя и не спадает до нулевого значения. Время, необходимое для установления стационарного распределения температуры, составляет порядка 1–2 минуты. Электронно-лучевое облучение в течение этого времени позволяет осуществить прогрев сварного шва до температуры размягчения кварцевого стекла, температура периферийной области устанавливается на уровне 300–600 °С.

Знание температурных градиентов совместно с контролем температуры стыка двух кварцевых трубок позволили осуществить их электронно-лучевую сварку. На рис. 5 приведена фотография сваренной трубки.

Полученный результат позволяет судить о принципиальной возможности осуществления такого производственного процесса как электронно-

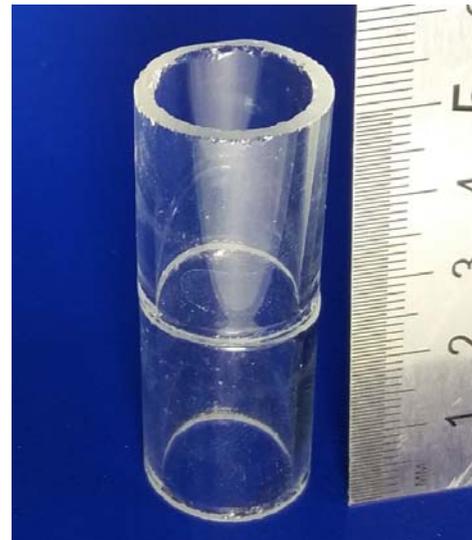


Рис. 5. Пример электронно-лучевой сварки цилиндрических кварцевых трубок.

лучевая сварка кварцевого стекла. Следует отметить тот факт, что торцы свариваемых трубок не подвергались дополнительным операциям шлифовки и полировки, обычно необходимых для плотного прилегания друг к другу. Отметим, что полученное в результате электронно-лучевой сварки соединение является герметичным. Более полное исследование параметров сварного соединения, а также отработка основных последовательных стадий сварки будут осуществлены в дальнейшем.

Заключение

В результате проделанной работы была отработана методика бесконтактного тепловизионного контроля температуры поверхности кварцевого стекла, нагреваемого электронным пучком, и исследованы зависимости распределения температур от параметров эксперимента. Представленные результаты расчета температурного поля кварцевого стекла, полученные с использованием метода конечных элементов, согласуются с экспериментальными данными. Экспериментально продемонстрирована возможность электронно-лучевой сварки кварцевых трубок.

В данной работе проведение экспериментальных исследований поддержаны грантом РФФИ № 16-38-60032 мол_а_дк. Расчеты тепловых полей осуществлялись в рамках госзадания Минобрнауки РФ (проектная часть) № 11.1550.2017/4.6. Е. М. Окс является исполнителем работ по теме «Организация проведения научных исследований» проект № 3.6441.2017/6.7.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кайдалов А. А. Электронно-лучевая сварка и смежные техники. – Киев: Экотехнология, 2004.
2. Ольшанский Н. А., Зайцев К. И. Сварка в машиностроении: справочник, том 2. – М.: Машиностроение, 1978.
3. Назренко О. К., Истомина Е. И., Лопшин В. Е. Электронно-лучевая сварка. – Харьков: Глобус, 1985.
4. Рыкалин Н. Н., Зуев И. В., Углов А. А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1978.
5. Mattox D. M. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing: Film Formation, Adhesion, Surface Preparation and Contamination Control. – Westwood, N.J.: Noyes Publications, 1998.
6. Бурдовитин В. А., Золотухин Д. Б., Зенин А. А., Окс Е. М., Тюньков А. В., Юшков Ю. Г. // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2017. Т. 20. № 3. С. 70.
7. Бурдовитин В. А., Климов А. С., Окс Е. М. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 11. С. 61.
8. Афанасьев А. В., Лебедев В. С., Орлов И. Я., Хрулев А. Е. // Приборы и техника эксперимента. 2001. № 2. С. 155.
9. Зенин А. А., Климов А. С., Бурдовитин В. А., Окс Е. М. // Письма в журнал технической физики. 2013. Т. 39. Вып. 10. С. 9.
10. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. – М.: Мир, 1984. [R. H. Gallagher. Finite Element Analysis: Fundamentals (Pearson College Div, 1975)].

PACS: 41.75.Fr

Distribution of thermal fields in a quartz glass during the electron-beam treatment by a plasma electron source

I. Yu. Bakeev¹, A. A. Zenin¹, A. S. Klimov¹, and E. M. Oks^{1,2}

¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40 Lenina av., Tomsk, 634050, Russia
E-mail: bakeeviyu@mail.ru

² Institute of High Current Electronics, SB RAS
2/3 Akademicheskoy av., Tomsk, 634055, Russia

Received March 13, 2018

The paper presents the results of investigation of a temperature field distribution in a quartz glass during electron-beam heating. It is shown that, despite the low coefficient of thermal conductivity of quartz glass, heating is carried out throughout the sample volume. The temperature gradient decreases with the increase in the time of the electron beam exposure. A qualitative model describing the electron beam heating of the joint of two quartz tubes is proposed, which makes it possible to estimate the parameters of the heating region during welding of the glass. The principal possibility of electron-beam welding of quartz tubes is shown.

Keywords: electron beam, forevacuum pressure range, thermal fields, thermal imaging measurement technique, welding, quartz glass.

REFERENCES

1. A. A. Kaidalov, *Electron beam welding and related technologies* (Ekotekhnologiya, Kiev, 2004) [in Russian].
2. N. A. Olshansky and K. I. Zaycev, *Welding in mechanical engineering: handbook, volume 2* (Mashinostroenie, Moscow, 1978) [in Russian].
3. O. K. Nazarenko, E. I. Istomin, and V. E. Lopshin, *Electron beam welding* (Globus, Harkov, 1985) [in Russian].
4. N. N. Rykalin, I. V. Zuev, and A. A. Uglov, *Fundamentals of electron beam treatment of materials* (Mashinostroenie, Moscow, 1978) [in Russian].
5. D. M. Mattox, *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing: Film Formation, Adhesion, Surface Preparation and Contamination Control* (Noyes Publications, Westwood, N. J., 1998).
6. V. A. Burdovitsin, D. B. Zolotukhin, A. A. Zenin, E. M. Oks, A. V. Tyun'kov, and Yu. G. Yushkov, *Doklady Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta Sistem Upravleniya i Radioelektroniki* **3**, 70 (2017).
7. V. A. Burdovitsin, A. S. Klimov, and E. M. Oks, *Technical Physics Letters* **6**, 511 (2009).
8. A. V. Afanas'ev, V. S. Lebedev, I. Ya. Orlov, and A. E. Khrulev, *Instruments and Experimental Techniques* **2**, 275 (2001).
9. A. A. Zenin, A. S. Klimov, V. A. Burdovitsin, and E. M. Oks, *Technical Physics Letters* **5**, 454 (2013).
10. R. H. Gallagher, *Finite Element Analysis: Fundamentals* (Pearson College Div, 1975; Mir, Moscow, 1984).