

Особенности лазерной технологии изготовления электронных компонент из хрупких неметаллических материалов

Е.Б. ШЕРШНЕВ

В статье рассматриваются особенности формирования температурных полей при лазерном управляемом термораскалывании электронных компонент из хрупких неметаллических материалов по произвольному контуру для производства изделий микроэлектроники. Математическое моделирование и численные расчеты температурных полей позволили определить динамику распределения температуры в пластине, облучаемой движущимся по криволинейной траектории световым пучком. Экспериментально исследовано влияние ориентации эллиптического пучка, хладагента и предварительного нагрева материала для обеспечения эффективности процесса термораскалывания.

Ключевые слова: моделирование, лазерное воздействие, термораскалывание, механическая прочность.

The article discusses the features of the formation of temperature fields during laser-controlled thermal splitting of electronic components made of brittle non-metallic materials along an arbitrary contour for the production of microelectronics products. Mathematical modeling and numerical calculations of temperature fields made it possible to determine the dynamics of temperature distribution in a plate irradiated by a light beam moving along a curvilinear trajectory. The influence of orientation of the elliptical beam, refrigerant, and material preheating on the efficiency of the thermal splitting process has been experimentally investigated.

Keywords: modeling, laser impact, thermal splitting, mechanical strength.

Введение. Разработка и интеграция компонентов для устройств отображения информации, основанных на жидкокристаллических экранах и электронно-оптических системах с применением лазерных технологий управляемого термораскалывания, представляет собой значимую научную и техническую задачу. Это направление открывает перспективы для создания высокопроизводительных технологий изготовления электронных компонент. Преимущества метода лазерного управляемого термораскалывания (ЛУТ) по сравнению с традиционными способами были детально исследованы и описаны в ряде научных публикаций [1]–[5]. Одной из ключевых особенностей данного процесса является обеспечение высокого качества кромок электронных компонент из хрупких неметаллических материалов, что способствует равномерному распределению прочности по всей их поверхности. Более того, данный метод позволяет осуществлять упрочнение торцевой поверхности, что критически важно для изделий, эксплуатируемых в условиях повышенных требований к прочностным характеристикам, например, для продукции конструкционной оптики, фотоэлектронных умножителей, защитных стёкол и др., где проблема повышения прочности является наиболее актуальной. Применение технологии лазерного управляемого термораскалывания обеспечивает создание таких электронных компонент из хрупких неметаллических материалов. Поскольку углы закругления характерны для большинства изделий, включая конструкционную оптику и оптоэлектронику, необходимо исследовать особенности лазерного управляемого термораскалывания по криволинейным контурам.

Как было продемонстрировано в предыдущих исследованиях [3]–[7], использование лазерного пучка эллиптического сечения, ориентированного вдоль направления разделения, позволяет повысить производительность процесса и точность обработки материала по сравнению с использованием пучков круглого или кольцевого сечения. В связи с этим были проведены математическое моделирование и исследования влияния ориентации эллиптического пучка относительно вектора скорости в процессе ЛУТ по криволинейному контуру.

Результаты численного моделирования и их обсуждение. Решена задача об определении температурных полей, формируемых в пластине при ее облучении движущимся по криволинейной траектории световым пучком.

При расчетах температурных полей, возникающих в результате обработки материалов лазерным излучением, использована модель светового пучка с гауссовым распределением.

Система координат ориентирована так, чтобы ось Z совпадала с нормалью к плоской поверхности облучаемого материала. Момент времени $t = 0$ соответствует прохождению луча через точку с координатами $X = R$, $Y = 0$, где R – радиус окружности, по которой движется лазерный луч, причем движение будем считать равноускоренным.

Для решения неоднородного линейного уравнения теплопроводности:

$$\nabla^2 \cdot T(\vec{r}, t) - \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} = \frac{-Q(\vec{r}, t)}{\lambda} \quad (1)$$

с источником:

$$Q(\vec{r}, t) = \gamma_0 \cdot P_0 \cdot \exp \left[\frac{-(x - R \cdot \cos(\omega \cdot t))^2 - (y - R \cdot \sin(\omega \cdot t))^2}{A^2} - \gamma_0 z \right] \quad (2)$$

воспользуемся методом, изложенным в [8]. В записанных формулах λ и α – соответственно теплопроводность и температуропроводность материала, P_0 – плотность мощности в центре пучка, A – радиус нормально круглого гауссового пучка, γ_0 – коэффициент поглощения среды, ω – угловая скорость движения гауссового пучка.

Интегрирование дает следующее выражение для температурного поля:

$$T(\vec{r}, t) = \frac{P_0 \cdot \gamma_0 \cdot a \cdot A^2}{2 \cdot \lambda} \int_0^t d\tau f(\vec{r}, \tau), \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} f(\vec{r}, \tau) = & \frac{\exp \left\{ \frac{-(x - R \cdot \cos(\omega \cdot \tau))^2 - (y - R \cdot \sin(\omega \cdot \tau))^2}{4 \cdot a \cdot \tau + A^2} \right\}}{4 \cdot a \cdot \tau + A^2} \times \\ & \times \{ \exp(\gamma_0^2 \cdot a \cdot \tau - \gamma_0 \cdot z) \cdot \operatorname{erfc}(\gamma_0 \cdot a \cdot \tau - z / \sqrt{4 \cdot a \cdot \tau}) + \\ & + \frac{\gamma_0 + h_0}{\gamma_0 - h_0} \exp(\gamma_0^2 \cdot a \cdot \tau + \gamma_0 \cdot z) \cdot \operatorname{erfc}(\gamma_0 \cdot a \cdot \tau + z / \sqrt{4 \cdot a \cdot \tau}) - \\ & - \frac{2 \cdot h_0}{\gamma - h_0} \exp(h_0^2 \cdot a \cdot \tau + h_0 \cdot z) \cdot \operatorname{erfc}(h_0 \cdot a \cdot \tau + z / \sqrt{4 \cdot a \cdot \tau}) \}. \end{aligned} \quad (4)$$

Выражение, определяемое (3), позволяет провести анализ динамики распределения температуры для конкретных технологических процессов ЛУТ по криволинейным траекториям, что позволит прогнозировать протекание сопутствующих указанному процессу тепловых явлений. В ряде случаев поглощение поверхностным т. е. γ можно считать бесконечно большим, при этом из выражения (3) получим:

$$\begin{aligned} T(\vec{r}, t) = & \int_0^t d\tau \cdot \frac{\exp \left\{ \frac{-(x - R \cdot \cos(\omega \cdot \tau))^2 - (y - R \cdot \sin(\omega \cdot \tau))^2}{4 \cdot a \cdot \tau + A^2} \right\}}{4 \cdot a \cdot \tau + A^2} \times \\ & \times \left[\exp \left(\frac{-z^2}{4 \cdot a \cdot \tau} \right) - h_0 \cdot \sqrt{\pi \cdot a \cdot \tau} \cdot \exp(h_0^2 \cdot a \cdot \tau + h_0 \cdot z) \cdot \operatorname{erfc}(h_0 \cdot a \cdot \tau + z / \sqrt{4 \cdot a \cdot \tau}) \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Воспользуемся решением (5) для проведения численного моделирования температурных полей в многокомпонентном силикатном стекле методом конечных элементов. Расчеты проводились для следующего режима: $P = 30$ Вт, радиус пучка 2,5 мм, угловая скорость резки 0,8 рад/с. Коэффициент теплоотдачи $\alpha = 420$ Вт/м²К соответствует охлаждению воздушным потоком со скоростью 10 м/с, радиус описываемой окружности $R = 5$ см. На рисунках 1 и 2 представлены температурные поля для $t = 1$ с на поверхности образца (на рисунке 1 представлено распределение температуры в декартовой системе, на рисунке 2 в виде изотерм).

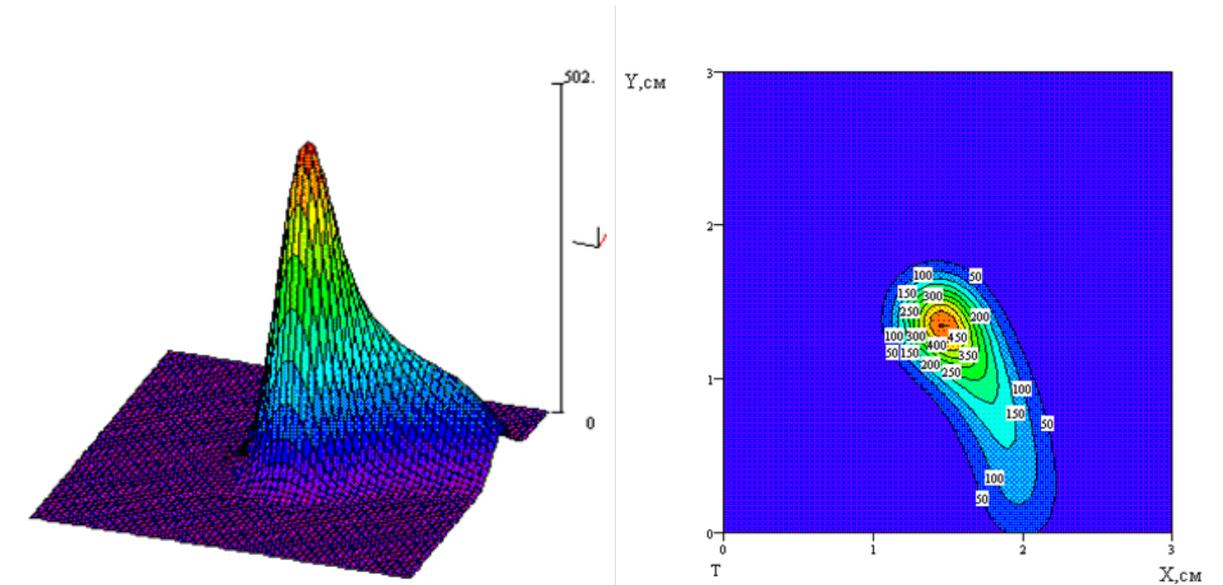


Рисунок 1 – Распределение температуры в декартовой системе координат в момент времени, $t = 1\text{ с}$

Рисунок 2 – Изотермы на плоскости XOY при: $t = 1\text{ с}, Z = 0$

На рисунках 3 и 4 представлены температурные поля для $t = 1\text{ с}$, при $Z = 0,3\text{ мм}$.

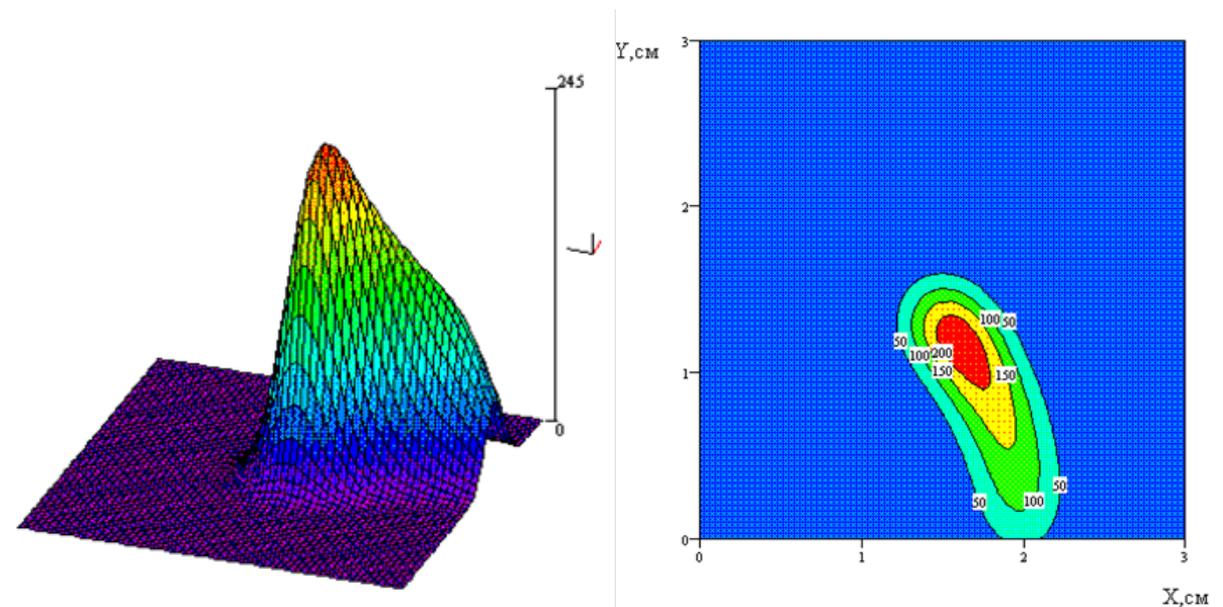


Рисунок 3 – Распределение температуры в декартовой системе координат $Z = 0,3\text{ мм}, t = 1\text{ с}$

Рисунок 4 – Изотермы на плоскости XOY при: $t = 1\text{ с}, Z = 0,3\text{ мм}$

Как видно из представленных на рисунках температурных распределений, при выбранных параметрах лазерного управляемого термораскалывания стекла максимальная температура на поверхности образца достигает $502\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствует температуре, реально наблюдаемой на эксперименте. На рисунках 5 представлена зависимость температуры от времени, рассчитанная в различных точка материала вдоль оси симметрии лазерного луча (1 – $Z = 0$; 2 – $Z = 0,15\text{ мм}$; 3 – $Z = 0,3\text{ мм}$) с учётом движения лазерного пучка.

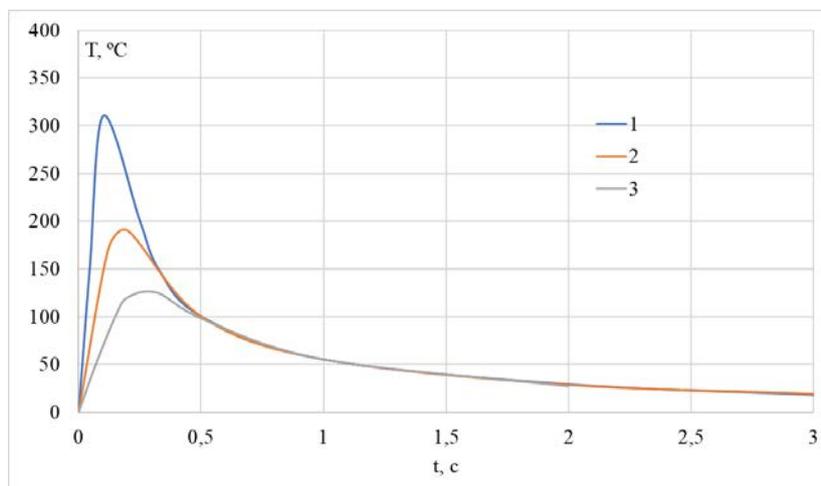


Рисунок 5 – Распределение температуры от времени по толщине образца ($\alpha = 420 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, $X = R$, $Y = 0$), 1 – $Z = 0$; 2 – $Z = 0,15 \text{ мм}$; 3 – $Z = 0,3 \text{ мм}$)

Из представленных графиков видно, что нагрев поверхности до максимальной температуры происходит быстрее, чем последующее остывание. Причем с увеличением глубины соответствующие кривые становятся более пологими.

Результаты экспериментальных исследований лазерного управляемого термораскалывания стеклоизделий в техпроцессах микроэлектроники. В ходе экспериментальных исследований установлена зависимость скорости термораскалывания от угла поворота эллиптического пучка по отношению к направлению движения (рисунок 6). При отклонении положения большей оси эллипса от направления, совпадающего с вектором скорости, значение последней резко уменьшается и достигает минимальной величины при нормальном положении оси эллипса лазерного пучка к направлению движения. При уменьшении отношения большой и малой осей эллиптического пучка уменьшается разность скоростей. Результаты согласуются с приведёнными выше теоретическими оценками о влиянии формы лазерного пучка на скорость ЛУТ.

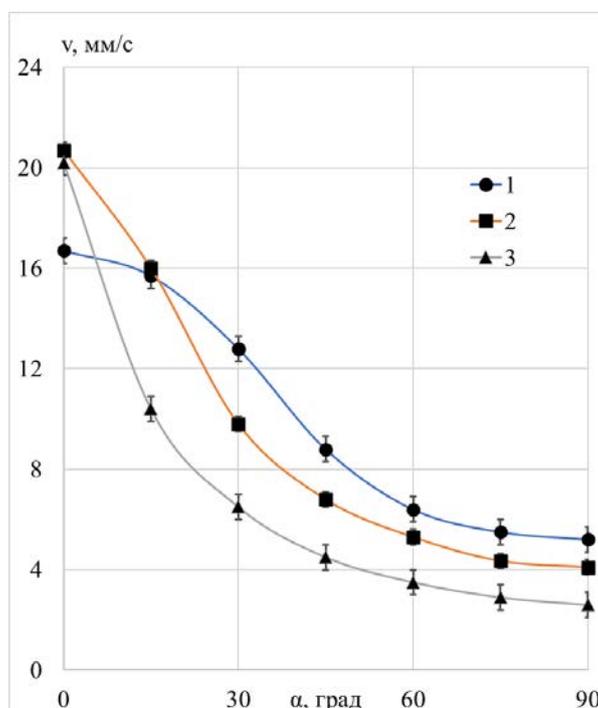


Рисунок 6 – Зависимость скорости термораскалывания v стекла толщиной 3 (1,3) и 2 мм (2) от угла поворота α относительно направления движения эллиптического пучка размерами $10 \times 1,5$ (1), $11 \times 2,5$ (2) и $12 \times 2 \text{ мм}$ (3)

Для обеспечения эффективной обработки материала посредством ЛУТ необходимо учитывать не только ориентацию лазерного эллиптического пучка относительно траектории перемещения, но и согласовывать положение хладагента с криволинейным контуром разделения. Это обусловлено запаздыванием момента контакта хладагента с поверхностью стекла относительно зоны влияния теплового источника.

Одновременный поворот механизма подачи хладагента и фокусирующего объектива может привести к смещению зоны воздействия хладагента с линии нагрева, что, в свою очередь, может привести к прерыванию процесса термораскалывания. Поэтому необходимо осуществлять независимый контроль и управление положением хладагента относительно линии реза отдельно от ориентации лазерного эллиптического пучка.

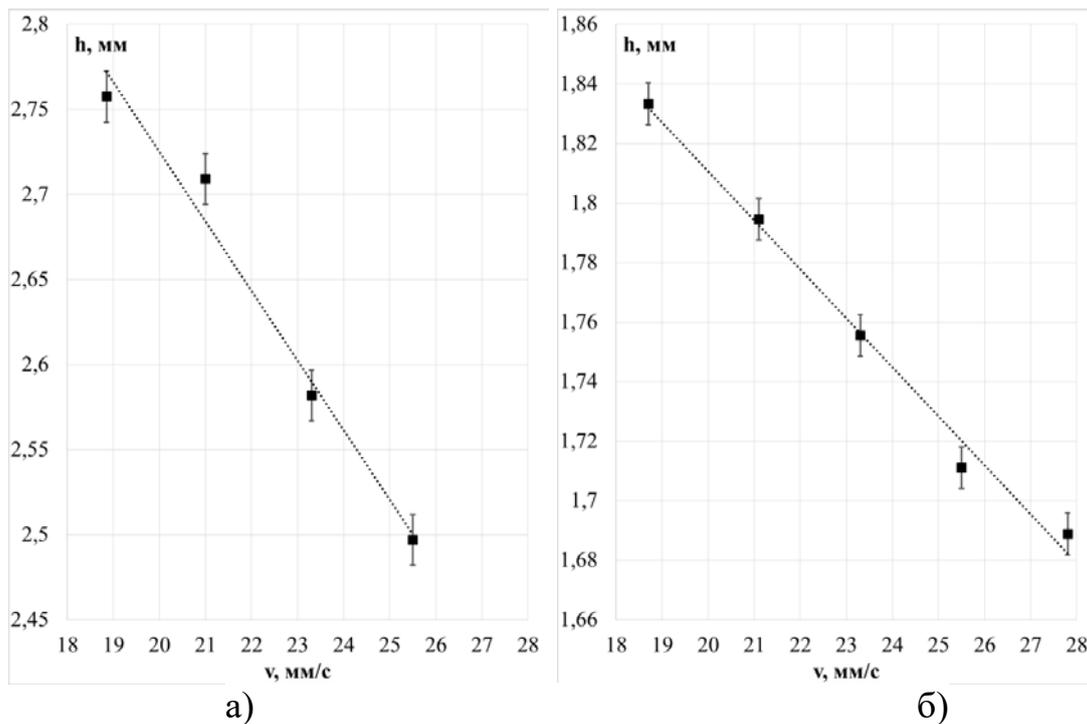


Рисунок 7 – Зависимость углубления (h) разделяющей микротрещины от скорости движения v при повторном нагреве стекла толщиной 3 (а) и 2 мм (б)

Лазерное управляемое термораскалывание по криволинейному контуру представляет собой процесс, в ходе которого необходимо создать сквозную трещину вдоль всего замкнутого контура. Для достижения этой цели наиболее эффективным методом является метод углубления разделяющей микротрещины путем повторного нагрева линии реза лазерным излучением (см. рисунок 7).

При использовании лазерного пучка эллиптического сечения необходимо строго ориентировать его по касательной к линии реза в любой точке криволинейного контура. Несоблюдение этого условия может привести к отклонению скола от перпендикулярного направления относительно поверхности стекла.

Установлено, что предварительный нагрев разрезаемого материала до температуры в интервале 40–120 °С создает в материале градиент температур, приводящего к возникновению термоупругих напряжений и увеличению скорости термораскалывания (рисунок 8). Вследствие нагрева линии реза лазерным излучением и охлаждения зоны нагрева вслед за лазерным пучком хладагента в предварительно нагретом стекле возникает значительно более глубокая трещина при большей скорости перемещения стекла. После повторного нагрева линии реза происходит углубление разделяющей трещины под действием возникающих термонапряжений.

В результате экспериментальных исследований установлено, что нагрев разрезаемой поверхности стекла до температуры ниже 40 °С неэффективен, а превышение температуры свыше 120 °С приводит к увеличению вероятности неуправляемого разрушения материала под действием термонапряжений.

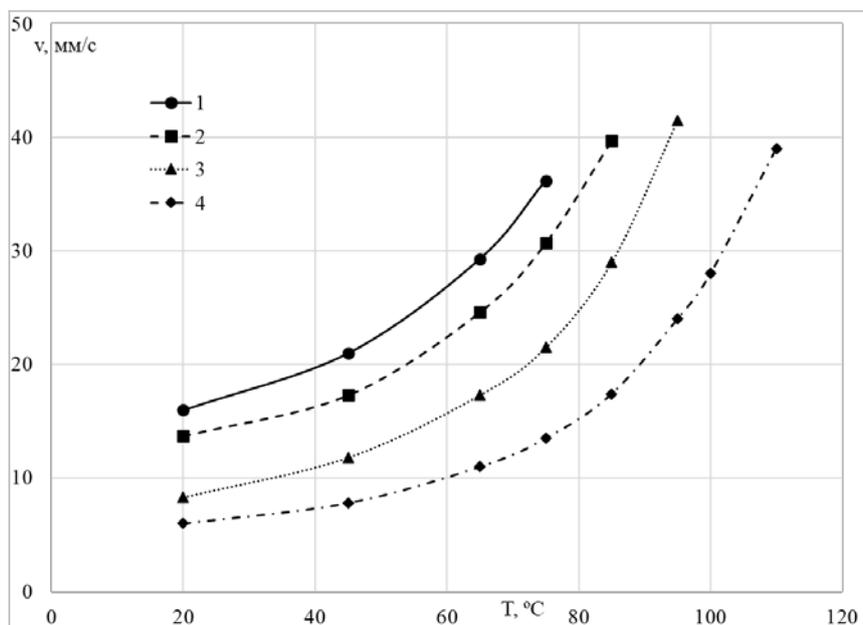


Рисунок 8 – Зависимость скорости ЛУТ v от температуры предварительного нагрева T разрезаемой поверхности стекла толщиной 2 мм (1, 2) и 3 мм (3, 4)

Предварительный нагрев поверхности материала обеспечивает наряду с увеличением скорости термораскалывания и увеличение глубины образующейся трещины. Экспериментально установлена линейная зависимость глубины образующейся трещины от температуры предварительного нагрева, разделяемой поверхности материала (рисунок 9а) и времени ее нагрева (рисунок 9б).

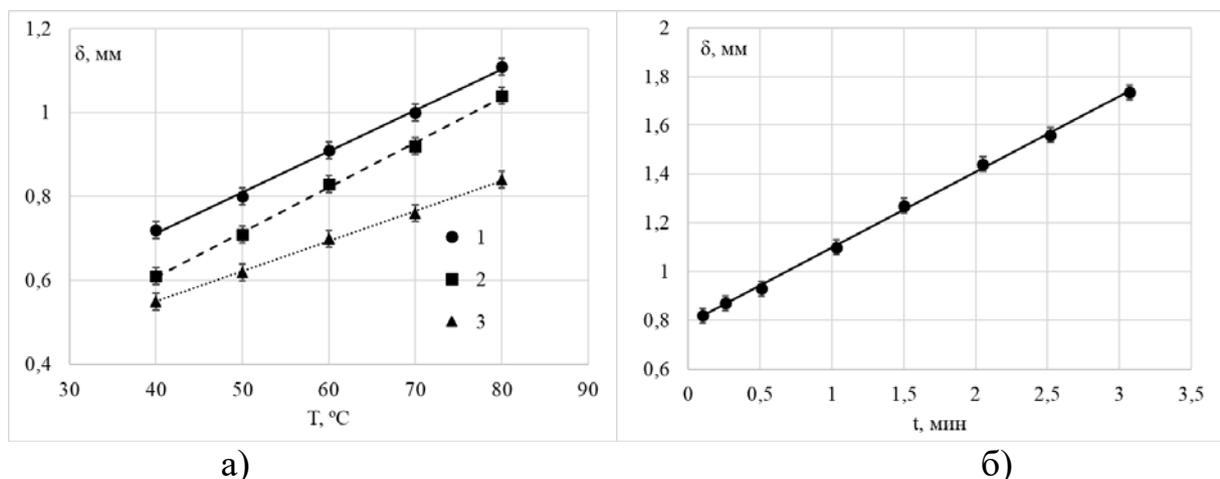


Рисунок 9 – Зависимость глубины микротрещины δ от температуры предварительного нагрева материала T (а) и от времени t (б)

Выводы. Особенности процесса ЛУТ хрупких неметаллических материалов по криволинейному контуру для компонентов электронной техники заключается в необходимости ориентации лазерного эллиптического пучка по касательной к линии разделения в любой точке криволинейного контура, что обусловлено существенной зависимостью скорости термораскалывания от угла поворота эллиптического пучка по отношению к вектору скорости. А так же в необходимости согласования с криволинейным контуром положения хладагента независимо от ориентации пучка, обусловленной запаздыванием места контакта хладагента с поверхностью стекла по сравнению с зоной воздействия теплового источника. Установлено, что для получения сквозной трещины по всему замкнутому контуру необходим повторный нагрев линии реза лазерным излучением.

Литература

1. Nisar, S. Laser glass cutting techniques – A review / S. Nisar // Journal of laser applications. – 2013. – Vol. 25, № 4. – P. 042010-1–11.
2. Шемелин, В. К. Исследование режимов лазерного управляемого термораскалывания оксидных стекол на основе применения ИК-лазера на парах стронция / В. К. Шемелин, А. В. Чирков, В. К. Сысоев // Автоматизация и современные технологии. – 2011. – № 2. – С. 8–13.
3. Управляемое гибридное светолазерное термораскалывание стекол / В. К. Сысоев [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2007. – Т. 33, вып. 1. – С. 54–59.
4. Никитюк, Ю. В. Оптимизация параметров лазерного раскалывания кварцевого стекла / Ю. В. Никитюк, А. Н. Сердюков, И. Ю. Аушев // Проблемы физики, математики и техники. – 2021. – № 4 (49). – С. 21–28.
5. Применение искусственных нейронных сетей и метода конечных элементов для определения параметров обработки кварцевых золь-гель стекол эллиптическими лазерными пучками / Ю. В. Никитюк, А. Н. Сердюков, В. А. Прохоренко, И. Ю. Аушев // Проблемы физики, математики и техники. – 2021. – № 3 (48). – С. 30–36.
6. Никитюк, Ю.В. Оптимизация лазерного раскалывания силикатных стекол эллиптическими пучками при дополнительном воздействии потока горячего воздуха / Ю.В. Никитюк, А.Н. Сердюков, И.Ю. Аушев // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. Сер.: Естественные науки. - 2023. – № 6(141). – С. 110–116.
7. Шершнев, Е. Б. Моделирование, эксперимент и оборудование для лазерного термораскалывания аморфного кварца / Е. Б. Шершнев, В. В. Свиридова, С. И. Соколов // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2008. – Т. 13, № 1. – С. 12–16.
8. Математическое моделирование процессов лазерного управляемого термораскалывания листового стекла / Е. Б. Шершнев, С. В. Шалупаев, С. И. Соколов // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2009. – № 4, ч. 2. – С. 204–212.

Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

Поступила в редакцию 23.10.2024