

УДК 621.373.826

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОГО УПРАВЛЯЕМОГО ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЯ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Е.Б. ШЕРШНЕВ, кандидат технических наук, доцент

В.В. СВИРИДОВА, кандидат физико-математических наук, доцент

С.И. СОКОЛОВ, аспирант

УО «Гомельский государственный университет им Ф.Скорин», г. Гомель, Беларусь

В статье рассматриваются результаты исследования по параллельному двулучевому термораскалыванию стекла. Проведен математический анализ температурных полей в стекле при параллельном двулучевом термораскалывании. Выявлена зависимость глубины и ширины трещины параллельной поверхности от плотности мощности излучения.

Ключевые слова: термораскалывание, микротрещина, нагрев, лазерное излучение.

Введение

В настоящее время стекло является одним из важнейших материалов в технике и производстве. Основной метод обработки стекла - направленное нарушение прочности стекла с помощью тепловых, абразивных и твердосплавных инструментов с последующим его разламыванием по намеченному контуру. Однако эти методы обработки стекла являются в большой степени субъективными, трудно поддаются автоматизации и имеют большую долю ручного труда, особенно при необходимости обеспечения высокой точности стеклянных изделий.

В настоящее время активно развивается направление лазерного управляемого термораскалывания хрупких неметаллических материалов [1]. Однако процесс внедрения в производство сдерживается с одной стороны большой стоимостью оборудования, с другой стороны достигнутый уровень имеет определенные технологические ограничения и требует проведения дальнейших исследований. В частности, внедрению процесса параллельного термораскалывания препятствует отсутствие надежного способа зарождения трещины параллельной поверхности, ограничение по толщине пластины, отделяемой лазерным методом, необходимость применять метод сканирования поверхности лазерным пучком.

Таким образом, анализ достигнутого уровня показывает, что усовершенствование технологии параллельного термораскалывания стекла является актуальной задачей. Это позволит улучшить имеющуюся технологию и получить новые технические решения по преодолению существующих недостатков, ограничивающих внедрение технологии.

Параллельное лазерное термораскалывание

При облучении поверхности стекла сфокусированным излучением CO_2 лазера энергия поглощается в тонком поверхностном слое глубиной 2-5 мкм в зависимости от химического состава стекла. Дальнейшее распространение тепловой энергии вглубь материала осуществляется за счет механизма теплопроводности. При этом максимальные напряжения сжатия сосредоточены на поверхности стекла в области воздействия сфокусированного лазерного излучения. Они ослабевают по мере распространения тепла вглубь исследуемого материала. Напряжения сжатия компенсируются напряжениями растяжения, которые сосредоточены по объему стекла на некоторой глубине в локальной области, определяемой зоной воздействия лазерного излучения.

Изменяя параметры лазерного излучения и скорость движения теплового источника относительно стекла, можно добиться условия, когда напряжения растяжения сосредоточенные в объеме стекла на некоторой глубине, превысят предел прочности стекла. В этом случае произойдет разрушение стекла параллельно облучаемой поверхности (рисунок 1). Возможность параллельного термораскалывания становится очевидной, если принять во внимание тот факт, что предел прочности стекла на сжатие в 8-10 раз выше, чем на растяжение.

Необходимым условием получения термораскалывания стекла параллельно поверхности является наличие направленного снижения его прочности в объеме на некотором расстоянии от поверхности. Одним из вариантов создания таких условий является нанесение в торце стекла надреза [2]. Однако это не обеспечивает надежного зарождения в стекле трещины параллельной поверхности, так как кромка стекла обладает достаточным количеством дефектов, которые, выступая в качестве опасных концентраторов напряжений, создают значительную конкуренцию надрезу в стекле.

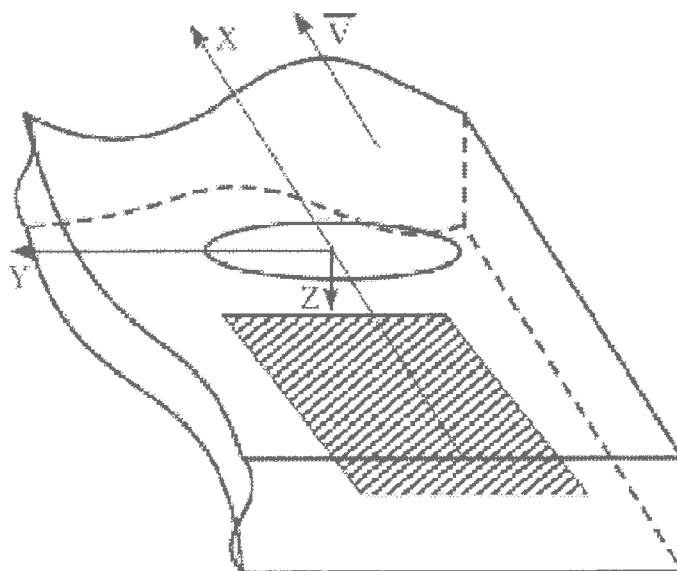


Рисунок 1 – Схема образования разделяющей трещины параллельной поверхности

Параллельное двулучевое лазерное термораскалывание

Для зарождения в стекле трещины параллельной поверхности можно использовать процесс лазерного управляемого термораскалывания стекла на заданную глубину - для этого на поверхности стекла наносят наклонную микротрещину. Предложен двухлучевой способ лазерного термораскалывания хрупких неметаллических материалов, сочетающий применение в качестве технологического инструмента излучения твердотельного лазера на алюмо-итриевом гранате (YAG) с длиной волны 1,06 мкм, распределение интенсивности которого по глубине стекла подчиняется закону Ламберта-Бугера-Бера, и излучения CO_2 -лазера с длиной волны 10,6 мкм, для которой стекло непрозрачно.

Полученные экспериментальные результаты доказывают возможность получения разделяющей микротрещины большей глубины, в случае применения двулучевой технологии и как следствие обеспечение повышения качества и точности обработки за счет устранения искривлений по линии деления материала при докалывании образцов. Причем, чем больше толщина обрабатываемого материала, тем значительней относительное увеличение глубины микротрещины по сравнению с методом лазерного управляемого термораскалывания. Кроме того, использование двулучевой технологии позволило уменьшить отрицательные краевые эффекты, сущность которых заключается в том, что при приближении микротрещины к границе образца она опережает лазерный пучок и, перерастая в сквозную трещину, неуправляемо развивающуюся в направ-

лении торца образца. Наклонное распространение микротрещины от поверхности стекла достигается с помощью смещения зоны охлаждения от линии нагрева траектории термораскалывания лазерным пучком. Пояснить образование наклонной микротрещины можно используя расчеты тепловых полей для лазерного пучка эллиптического сечения при ориентации осей эллипса под углом к направлению относительно перемещения пучка и стекла.

Асимметричный нагрев выражается в нарушении симметрии фронта нагрева при ориентации осей эллипса под углом к направлению относительно перемещения пучка и стекла. Тогда с учетом асимметрии фронта нагрева температурное поле запишется в виде:

$$T(r,t) = \frac{P_0 \gamma a A B}{2\lambda} \int_0^t \frac{d\tau \exp \left\{ -\frac{(S-V(t-\tau))^2 \cos^2 \alpha}{4a\tau + A^2} - \frac{(S-V(t-\tau))^2 \sin^2 \alpha}{4a\tau + B^2} \right\} f(z,\tau)}{\sqrt{(4a\tau + A^2)(4a\tau + B^2)}} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} f(z,\tau) = & \exp \left\{ \gamma^2 a \tau - \gamma z \right\} \operatorname{erfc} \left(\gamma \sqrt{a\tau} - \frac{z}{2\sqrt{a\tau}} \right) + \\ & + \frac{\gamma + h}{\gamma - h} \exp \left\{ \gamma^2 a \tau + \gamma z \right\} \operatorname{erfc} \left(\gamma \sqrt{a\tau} + \frac{z}{2\sqrt{a\tau}} \right) - \\ & - \frac{2h}{\gamma - h} \exp \left\{ hz + h^2 a \tau \right\} \operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{a\tau}} + h\sqrt{a\tau} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

где $\operatorname{erfc}(\rho) = 1 - \operatorname{erf}(\rho)$, $\operatorname{erf}(\rho) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\rho e^{-u^2} du$ - интеграл вероятности, где

ρ - предел интегрирования.

Полное решение задачи о распределении температурных полей и термоупругих напряжений с учетом поверхностного и объемного поглощения даны в работе [3].

Асимметричный нагрев и смещение хладагента относительно оси теплового потока на некоторое расстояние приведет к образованию микротрещины на поверхности со смещением последней относительно оси нагрева. В силу существующего распределения термоупругих напряжений, микротрещина по глубине стекла выйдет на осевую линию с максимальной температурой нагрева. Тем самым создаются условия для зарождения процесса термораскалывания в стекле в плоскости параллельной поверхности от наклонной поверхности.

В соответствии с приведенной на рисунке 2 моделью процесса двулучевого разделения, было выполнено конечно-элементное решение задачи о распределении термоупругих полей в образце конечной толщины в квазистатической постановке. Анализ этого решения показал, что основной вклад в развитие трещины параллельной поверхности вносят напряжения ориентированные перпендикулярно поверхности нагрева. Эти напряжения, будучи на поверхности равными нулю, в глубине стекла могут достигать величин равных и превышающих значение технической прочности стекла. Учитывая, что зарождение трещины параллельной поверхности стекла осуществляется от наклонной микротрещины на поверхности стекла и зная ее глубину можно с достаточной точностью прогнозировать развитие трещины параллельной поверхности стекла и параметры лазерного излучения необходимые для осуществления процесса.

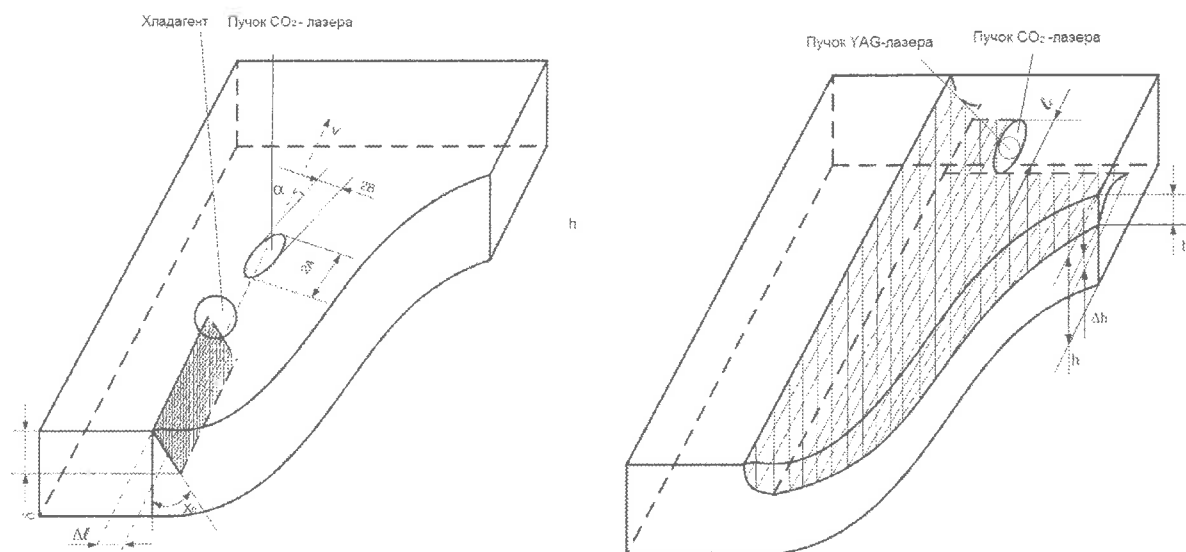


Рисунок 2 – Схема получения стеклопластин заданной толщины методом лазерного параллельного термораскалывания стекла:
а - образование наклонной микротрещины; б – сканирование стекла для разделения в плоскости параллельной поверхности стекла.

Проведены исследования по влиянию на режимы термораскалывания одновременного воздействия лазерного излучения с длинами волн 1,06 и 10,6 мкм. С целью увеличения глубины трещины в объеме стекла при постоянной скорости процесса, достигнутые при термораскалывании излучением лазера с длиной волны 10,6 мкм, были проведены следующие экспериментальные исследования.

Максимальную глубину трещины определяли при достижении перегрева стекла, о чем свидетельствовали характерные признаки — на поверхности образовывалась сеть

мелких трещин. После чего добивались уменьшением скорости их исчезновения. Получено, что максимальная глубина составляет 0,97 мм при скорости относительного перемещения 5 мм/с.

Центр пучка CO_2 лазера совместили с излучением YAG-лазера (рисунок 2а). Излучение с длинной волны 1,06 мкм поглощается в объеме стекла по закону Бугера-Ламберта, в отличие от излучения с длиной волны 10,6 мкм, где поглощение носит поверхностный характер. При заданных характеристиках сфокусированного излучения CO_2 -лазера ($3,24 \text{ Вт/мм}^2$) диапазон изменения плотности мощности YAG лазера составил $(3,69-48,14) \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$ без перегрева поверхности стекла.

Установлено, что глубина залегания трещины параллельной поверхности при совмещении двух лазерных пучков и постоянной скорости процесса увеличилась по сравнению с исходным значением на 236%. Одновременно с ростом глубины трещины наблюдается рост ширины трещины параллельной поверхности (рисунок 3)

По полученным данным были построены следующие зависимости:

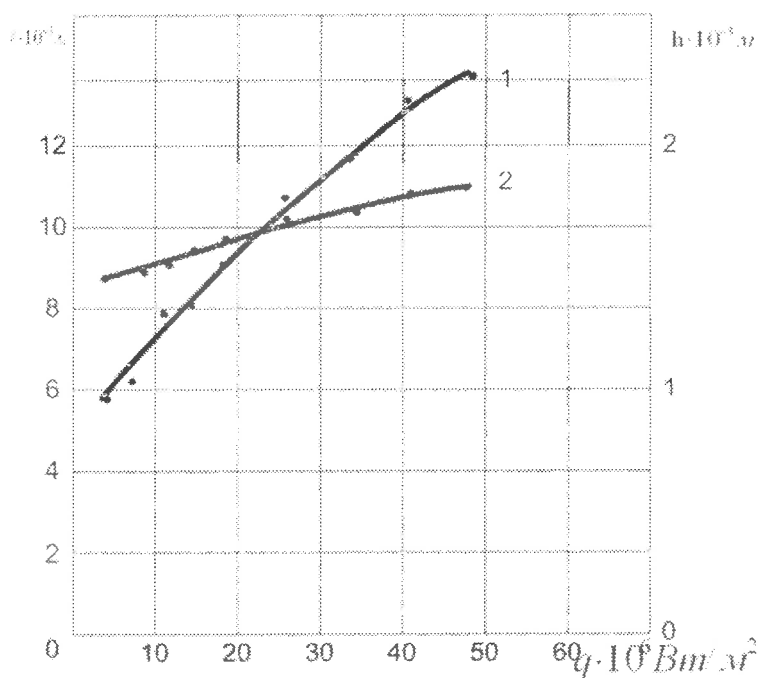


Рисунок 3 — Зависимость глубины (1) и ширины (2) трещины параллельной поверхности от плотности мощности излучения YAG-лазера

Заключение. В ходе проведения эксперимента было установлено, что для устойчивого зарождения в стекле трещины параллельной поверхности можно использовать наклонную микротрещину. Также установлено, что одновременное применение двух лазерных излучений ИК диапазона с приведенными выше характеристиками по-

звояет расширить возможности известного способа термораскалывания стекла в плоскости параллельной поверхности. Следует ожидать значительное повышение производительности процесса за счет увеличения скорости при заданной толщине откалываемой пластины. Из приведенных зависимостей видно, что второй источник излучения с длиной волны $\lambda=1,06$ мкм, позволяет практически в 2 раза увеличить глубину трещины параллельную поверхности.

Обозначения

$Q(r, t)$ - плотность внешних источников тепла; $T(r, t)$ – распределение температурного поля; λ - коэффициент теплопроводности; a - коэффициенты температуропроводности; γ - коэффициент поглощения среды; P_0 - плотность мощности в центре теплового пучка; A, B - полуоси эллиптического гауссова пучка; v - скорость движения лазерного пучка; $\text{erf}(\rho)$ – интеграл вероятности; r_0 радиус теплового пучка; α – угол поворота эллиптического пучка CO_2 -лазера относительно движения;

Литература

1. Г. А. Мачулка. Лазерная обработка стекла. – М.: Сов. радио, 1979. – 136 с.
2. А. Г. Григорьянц, А. А. Соколов. Лазерная обработка неметаллических материалов // Лазерная техника и технология. Учебное пособие для вузов в 7 кн. Кн. 4. – М.: Высш. шк. 1988. – 191с.
3. Е.Б. Шершнёв, В.В., В.В. Свиридова, С.И. Соколов. Моделирование, эксперимент и оборудование для лазерного термораскалывания кварцевого стекла //Материалы.Инструменты.Технологии.- Гомель, ИММС НАНБ, 2008, Том 13, №1. - 13 с.

Поступила в редакцию 16.06.2008

E.B. Shershnev, V.V. Sviridova, S.I. Sokolov

OPTIMIZATION OF PROCESS OF LASER OPERATED PARALLEL THERMOSPLITTING OF FRAGILE NONMETALLIC MATERIALS

In article results of research on parallel two-beam thermosplitting of glass are considered. The mathematical analysis of temperature fields in glass is carried out at parallel two-beam thermosplitting. Dependence of depth and width of a crack of a parallel surface from density of capacity of radiation is revealed.