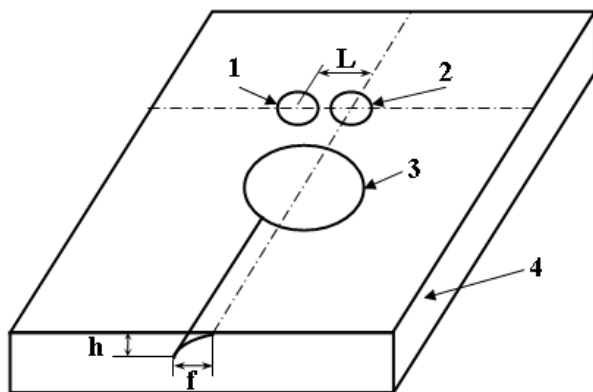


С.В. Шалупаев, Ю.В. Никитюк, А.А. Серeda, В.В. Свиридова

**УО «Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины», Беларусь**

ДВУЛУЧЕВОЙ ЛАЗЕРНЫЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ СКРУГЛЕННЫХ КРОМОК В СТЕКЛОИЗДЕЛИЯХ

Наиболее эффективным способом разделения хрупких неметаллических материалов в настоящее время является метод управляемого лазерного термораскалывания. Сущность его заключается в локальном поверхностном нагреве материала лазерным излучением с последующим резким охлаждением зоны нагрева хладагентом. В результате в области подачи хладагента образуется трещина, следующая за лазерным пучком. Этой тематике посвящен ряд работ [1–7]. В результате исследований по данной тематике был разработан целый ряд методов прецизионной лазерной обработки хрупких неметаллических материалов, одним из которых является метод асимметричного лазерного термораскалывания. Данный метод позволяет получить наклонную трещину со скругленными кромками. Различные варианты реализации данного метода предложены авторами в работе [3]. В этой работе для формирования асимметричного распределения термоупругих полей в образцах из силикатных стекол использовано воздействие лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм, поглощаемое в тонких поверхностных слоях обрабатываемого материала. В одном случае асимметричность распределения достигается за счет нагрева поверхности материала эллиптическим лазерным пучком, ориентированным под углом к направлению относительного перемещения, а во втором асимметричность распределения достигается за счет смещения хладагента относительно линии воздействия лазерного излучения. В представленной работе авторами проведены исследования процесса получения скругленных кромок стеклоизделий с использованием двух лазерных пучков с различными длинами волн 10,6 мкм и 1,06 мкм [4–5].



1 – YAG-лазер; 2 – CO₂-лазер;
3 – хладагент; 4 – стеклянная
пластина

Рисунок 1 – Схема расположения лазерных пучков и хладагента

На рисунке 1 представлена схема взаимного расположения лазерных пучков и хладагента на поверхности обрабатываемого материала. Выполнены экспериментальные исследования зависимости глубины h и отклонения f трещины от линии обработки при различных значениях взаимного смещения лазерных пучков L и скоростях обработки v . Экспериментальные исследования были выполнены на лазерном технологическом комплексе, в состав которого входят два лазера с различной длиной излучения.

Обрабатываемая стеклянная пластина толщиной 4 мм перемещается координатным столом относительно неподвижных лазерных пучков и хладагента. Пучок CO₂-лазера с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм формировали на поверхности в виде круга диаметром 3 мм, пучок YAG-лазера с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм в виде круга диаметром 2 мм, хладагент подавали на поверхность в виде мелкодисперсной воздушно-водяной смеси диаметром 5 мм. При этом пучок CO₂-лазера и хладагент на поверхности обрабатываемой пластины располагали на линии обработки, расстояние между их центрами составляло 4 мм. Центр пучка YAG-лазера смещали относительно центра пучка CO₂-лазера вдоль линии перпендикулярной линии обработки. Расстояние L между центрами лазерных пучков изменяли от 0 до 2 мм. Мощность лазерных пучков $P_1 = 30$ Вт для CO₂-лазера и $P_2 = 100$ Вт для YAG-лазера. Оба лазера работают в непрерывном режиме.

На рисунке 2 представлены экспериментальные зависимости глубины трещины h и экспериментальные зависимости отклонения трещины f при различных скоростях обработки для величин смещения YAG-лазера L равных 0,5 мм, 1 мм и 1,5 мм.

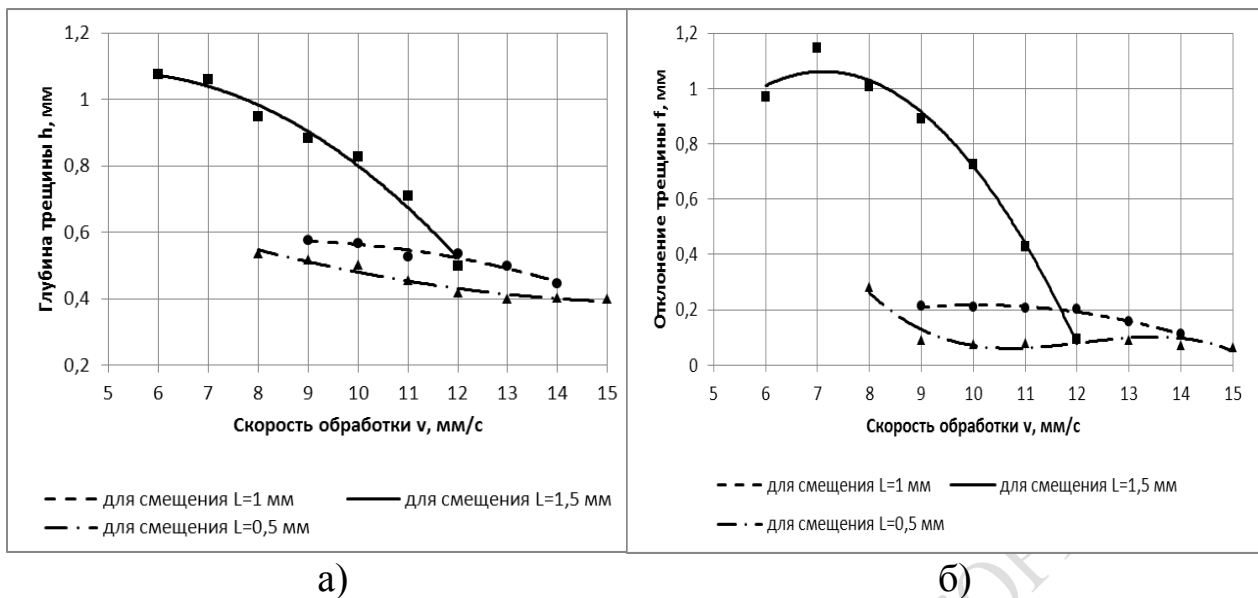


Рисунок 2 – Экспериментальная зависимость глубины (а) и отклонения трещины (б) для величины смещения лазерных пучков $L = 0,5–1,5$ мм

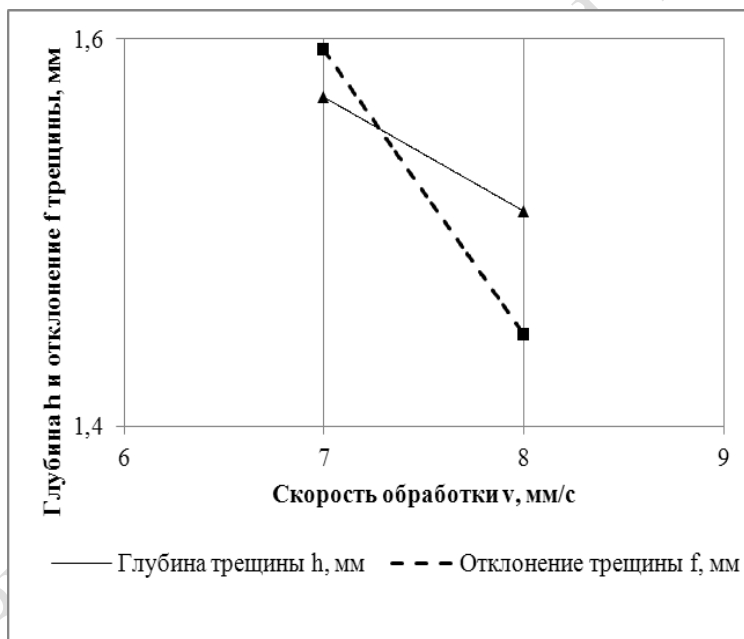
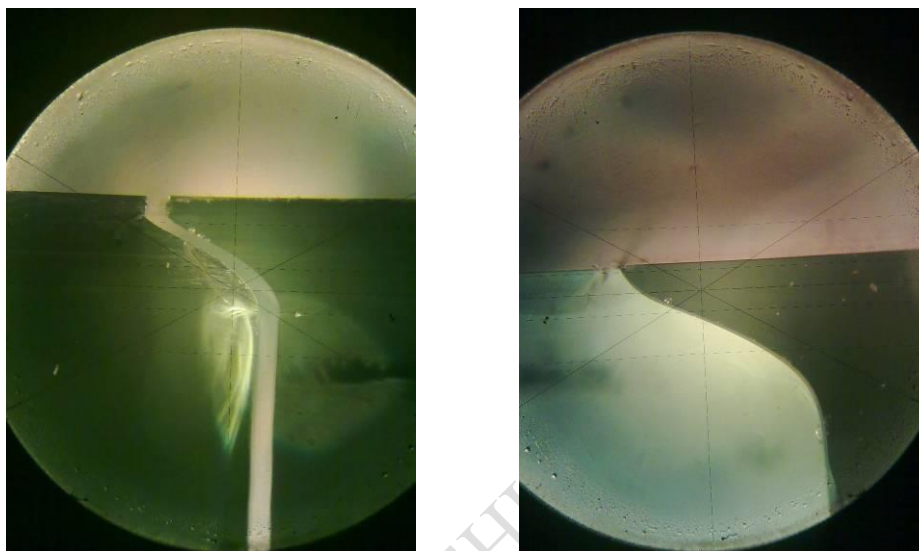


Рисунок 3 – Экспериментальная зависимость глубины и отклонения трещины для величины смещения лазерных пучков $L = 2$ мм
 На рисунке 3 аналогичные зависимости для величины смещения YAG-лазера L равном 2 мм.

Для каждой выбранной скорости обработки были получены несколько образцов, по каждому образцу получены значения глубин и отклонений трещин и выведено среднее их значение. Зарождение трещины происходит на поверхности обрабатываемого материала в области подачи хладагента на линии воздействия пучка CO_2 -лазера. Далее трещина распространяется вглубь материала, при этом откло-

няясь в сторону линии воздействия пучка YAG-лазера, и на различной для каждого режима обработки глубине прекращает свое развитие. Окончательное разделение можно выполнить путем докальвания (механического, термического, ультразвукового). Профиль торцов разделенного образца представлен на рисунке 4.



а)

б)

а) – для параметров обработки $v = 8$ мм/с, $L = 1,5$ мм

б) для параметров обработки $v = 7$ мм/с, $L = 2$ мм

Рисунок 4 – Профиль торцов разделенного образца

Видно, что на торце одной части разделенного образца образуется фаска, а на торце другой части выступ. Из анализа представленных на рисунках 1–3 зависимостей видно, что с увеличением скорости обработки наблюдается общее уменьшение глубины трещины и величины ее отклонения от линии обработки. При этом диапазон скоростей, для которых наблюдается устойчивое зарождение и развитие трещины, отличается для различных величин смещения L пучка YAG-лазера от линии обработки. Так, для смещения $L = 0,5$ мм этот диапазон для заданных параметров лазерных пучков лежит в пределах от 9 до 20 мм/с. С увеличением скорости наблюдается уменьшение глубины трещины, при этом отклонение трещины от линии воздействия пучком CO₂-лазера остается практически неизменным. На скорости 8 мм/с трещина развивается на всю толщину образца, т. е. наблюдается процесс сквозного термораскалывания, а отклонение трещины значительно увеличивается. При меньших скоростях в области воздействия пучком CO₂-лазера температура на поверхности превышает температуру стеклования, и при последующем охлаждении на поверхности образу-

ется сетка микротрещин и развития трещины не наблюдается. На скоростях более 20 мм/с отсутствует зарождение трещины. Следует отметить, что для данного смещения L на скоростях 9 и 10 мм/с профиль трещины получается отличным от общего вида, представленного на рисунке 4. Как видно из рисунка 5, зарождение трещины происходит на поверхности образца на линии воздействия пучка CO_2 -лазера, затем трещина развивается вглубь, отклоняясь в сторону линии воздействия YAG-лазера. Однако на некоторой глубине трещина вновь отклоняется в сторону линии воздействия пучка CO_2 -лазера, образуя своеобразную «волну».

Для смещения $L = 1$ мм диапазон скоростей, при котором наблюдается устойчивое зарождение и развитие наклонной трещины, составляет 9–14 мм/с.

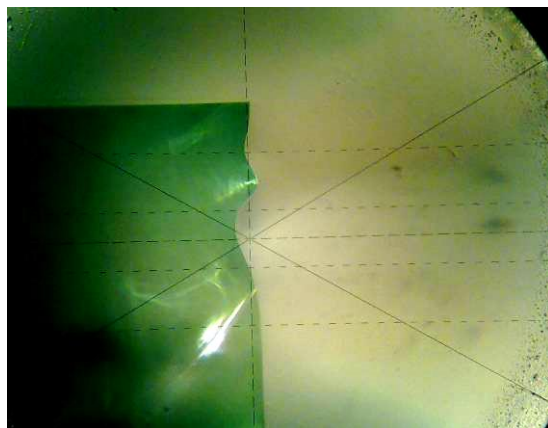


Рисунок 5 – Вид «волнообразной» трещины

Для $L = 1,5$ мм – 7–11 мм/с. При этом на скорости обработки 6 мм/с также еще наблюдается устойчивое развитие наклонной трещины, однако на поверхности вследствие перегрева образуется сетка микротрещин, что приводит к снижению величины отклонения трещины. Для скорости обработки 12 мм/с влияние YAG-лазера перестает быть ощутимым, и образующаяся на линии воздействия пучка CO_2 -лазера трещина развивается вглубь практически перпендикулярно поверхности. Для смещения $L = 2$ мм диапазон скоростей оказался достаточно узким – от 7 до 8 мм/с. При этом величины отклонения и глубины трещины оказываются наибольшими.

Таким образом, на основе полученных результатов можно сделать вывод, что предложенный метод двулучевого асимметричного лазерного термораскалывания позволяет эффективно получать изделия из силикатных стекол со скругленными кромками. При этом параметры

скругленных кромок можно задавать, варьируя технологические режимы обработки.

Следует отметить еще один положительный эффект, полученный в ходе исследований. Для измерения глубины h и отклонения f после получения наклонной трещины, перед докалыванием образца, наносилась еще одна трещина, перпендикулярная линии обработки с использованием только пучка CO_2 -лазера и хладагента. Трещину нанесли в соответствии с рисунком 1 справа налево. От основания выступа наклонной трещины наблюдается устойчивое зарождение и развитие трещины параллельной поверхности обрабатываемого материала, т. е. осуществляется процесс параллельного лазерного термораскалывания. Появление параллельной трещины наблюдается при отклонениях наклонной трещины f свыше 0,6 мм для относительного смещения лазерных пучков L равных 1,5 и 2 мм. При этом зарождение параллельной трещины происходит точно в основании выступа. Таким образом, регулируя отклонение и глубину наклонной трещины, можно зарожать параллельную трещину на заданной глубине.

Литература

1. Lumley, R.M. Controlled separation of brittle materials used a laser / R.M. Lumley // J. Of the Amer. Cer. Soc. – 1968. – Vol. 49, № 9. – P. 850–854.
2. Мачулка, Г.А. Лазерная обработка стекла / Г.А. Мачулка. – М.: Сов. радио, 1979. – 136 с.
3. Способ резки неметаллических материалов: пат. 2024441 РФ, МКИ 5 C03B33/02 / В.С. Кондратенко; заявитель В.С. Кондратенко; заявл. 04.02.92; опубл. 12.15.94
4. Двухлучевое лазерное термораскалывание хрупких неметаллических материалов / С.В. Шалупаев, Е.Б. Шершнева, Ю.В. Никитюк, А.А. Середа // Оптический журнал. – 2005. – Т. 73, № 5. – С. 62–66.
5. Шалупаев, С.В. Лазерное термораскалывание хрупких неметаллических материалов по замкнутым криволинейным контурам / С.В. Шалупаев, Ю.В. Никитюк, А.А. Середа // Оптический журнал. – 2008. – Т. 75, № 2. – С. 11–15.
6. Увеличение эффективности управляемого лазерного термораскалывания диэлектрических материалов / В. К. Сысоев [и др.] // Оптический журнал. – 2004. – Т. 71, № 2. – С. 65–69.
7. Jiao, J. Cutting glass substrates with dual-laser beams / J. Jiao, X. Wang // Optics and Lasers in Engineering. – 2009. – Vol. 47. – P. 860–864.