

Сравнительный анализ применения CO₂-, СО- и YAG-лазеров для прецизионной лазерной резки изделий из силикатного стекла

С. В. ШАЛУПАЕВ, А. А. СЕРЕДА, Ю. В. НИКИТЮК, В. В. СВИРИДОВА

Одним из направлений применения лазеров в технологических целях являются процессы высокоточного разделения хрупких неметаллических материалов. Наиболее эффективным и качественным методом разделения хрупких неметаллических материалов, в частности изделий из стекла, является метод управляемого лазерного термораскалывания. Сущность данного метода заключается в локальном нагреве материала до температуры не превышающей температуры размягчения стекла и последующим охлаждением нагретой зоны. При этом в зоне подачи хладагента образуется микротрещина вдоль линии обработки в

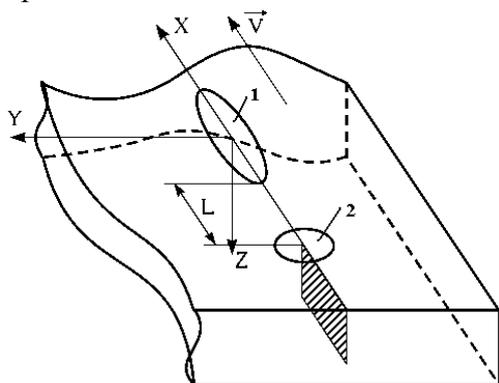


Рисунок 1 – Схема образования микротрещины при управляемом лазерном термораскалывании

плоскости перпендикулярной поверхности материала. В работах [1-3] рассматривается метод управляемого лазерного термораскалывания с применением в качестве источника излучения лазера на углекислом газе и раскрывается механизм образования микротрещины. Для пояснения механизма образования микротрещины методом конечных элементов был выполнен расчет термоупругих полей, возникающих внутри материала в результате совместного воздействия излучения CO₂-лазера и хладагента. Схема реализации представлена

на рисунке 1. Позицией 1 отмечена проекция лазерного пучка на поверхности материала, 2 – проекция хладагента. В расчетах полагалось, что лазерная мощность поглощается тонким поверхностным слоем стекла и распространяется по объему за счет теплопроводности. Глубина слоя, в котором происходит практически полное поглощение, близка к длине волны лазерного излучения. В соответствии с этим на поверхности материала моделировался тепловой источник в виде эллипса с размерами большой и малой полуосей 4 и 1 мм соответственно и мощностью 20 Вт. Непосредственно за данным источником на поверхность материала подавался хладагент в виде воздушно-водяной смеси с поперечным сечением в виде круга радиусом 2,5 мм и коэффициентом теплоотдачи 6800 Вт/м² К. Теплофизические параметры образца соответствовали силикатному стеклу вертикальной вытяжки [4], скорость обработки приравнивалась 10 мм/с. На рисунке 2 представлены кривые значений величины упругих напряжений σ_{22} вдоль линии обработки на различных глубинах образца в определенный момент времени. Кривая 1 соответствует поверхности образца, кривая 2 – глубине 0.1 мм, кривая 3 – глубине 0.2 мм, кривая 4 – глубине 0.3 мм, кривая 5 – глубине 0.4 мм. Данные графики являются аналогом временной зависимости величины напряжений σ_{22} в фиксированной точке. Из представленных на рисунке 2 кривых видно, что в зоне воздействия лазерного излучения (по оси x между отметками 17 и 25 мм) формируется зона значительных сжимающих напряжений, а в зоне подачи хладагента (по оси x между отметками 12 и 17 мм) формируется зона растягивающих напряжений. При этом максимальная температура стекла на поверхности составляет 530°С, что близко к температуре стеклования для силикатного стекла вертикальной вытяжки. Иницирование разделяющей микротрещины происходит в поверхностных слоях материала от трещиноподобного дефекта микроструктуры в зоне растягивающих напряжений, сформированных за счет подачи хладагента. Далее начальная микротрещина начинает свое движение и

распространяется до зоны сжимающих напряжений, сформированных лазерным излучением. Распределение сжимающих напряжений в объеме образца определяет форму и глубину проникновения микротрещины, инициализация и интенсивное развитие которой, происходит в зоне растягивающих напряжений, сформированных в области подачи хладагента.

После достижения микротрещиной максимальной глубины проникновения нестационарный рост трещины прекращается, и дальнейшее ее движение определяется изменением пространственного распределения зон растягивающих и сжимающих напряжений, обусловленных взаимным перемещением обрабатываемого материала, лазерного излучения и хладагента. После нанесения микротрещины окончательного разделения образца можно достичь путем механического, термического или ультразвукового докалывания [5].

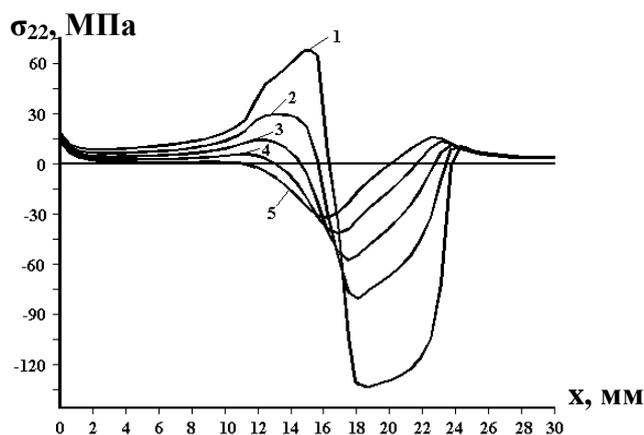


Рисунок 2 – кривые значений величины упругих напряжений при использовании в качестве источника излучения CO₂-лазер

Добиться увеличения глубины микротрещины можно уменьшив скорость обработки и плотность мощности лазерного излучения. Но снижение скорости приводит к уменьшению производительности, что недопустимо в современном промышленном производстве. Вследствие этого метод управляемого лазерного термораскалывания приемлем для стекол толщиной до 5 мм. Данная проблема может быть решена, если в качестве источников излучения использовать лазеры, излучение которых поглощается в объеме материала.

В работах [6-7] предложено дополнительно с излучением CO₂-лазера использовать излучение YAG-лазера, длина волны которого соответствует объемному поглощению стекла.

Было показано, что в случае двухлучевой обработки, за счет объемного поглощения материалом излучения YAG-лазера, область сжимающих напряжений располагается в более глубоких слоях материала, что обеспечивает увеличение глубины разделяющей микротрещины наблюдаемое на эксперименте в 1,5 раза в сравнении с однолучевой обработкой. Однако данный способ, при неоспоримой эффективности, требует создания технологических комплексов, в состав которых входят CO₂-лазер и YAG-лазер одновременно. Стоимость таких установок зачастую очень велика, что увеличивает себестоимость производимой продукции.

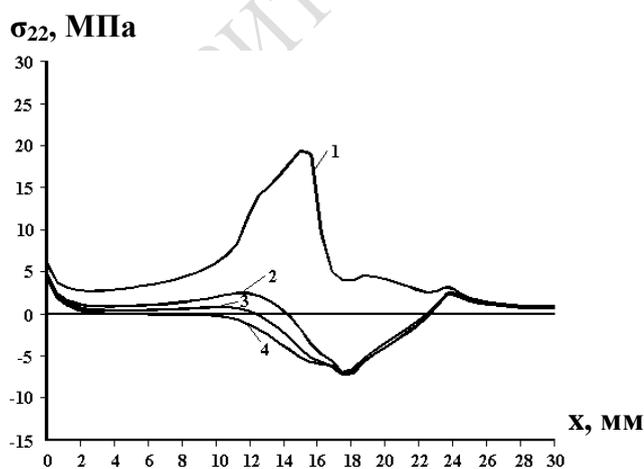


Рисунок 3 – Кривые значений величины упругих напряжений при использовании в качестве источника излучения YAG-лазера

нанный рост трещины прекращается, и дальнейшее ее движение определяется изменением пространственного распределения зон растягивающих и сжимающих напряжений, обусловленных взаимным перемещением обрабатываемого материала, лазерного излучения и хладагента. После нанесения микротрещины окончательного разделения образца можно достичь путем механического, термического или ультразвукового докалывания [5]. Нанесенные микротрещины с использованием CO₂-лазера обладают сравнительно небольшой глубиной по отношению к толщине материала. Это в свою очередь накладывает ограничения на качественное докалывание образцов. Добиться увеличения глубины микротрещины можно уменьшив скорость обработки и плотность мощности лазерного излучения. Но снижение скорости приводит к уменьшению производительности, что недопустимо в современном промышленном производстве. Вследствие этого метод управляемого лазерного термораскалывания приемлем для стекол толщиной до 5 мм. Данная проблема может быть решена, если в качестве источников излучения использовать лазеры, излучение которых поглощается в объеме материала.

В работах [6-7] предложено дополнительно с излучением CO₂-лазера использовать излучение YAG-лазера, длина волны которого соответствует объемному поглощению стекла.

Было показано, что в случае двухлучевой обработки, за счет объемного поглощения материалом излучения YAG-лазера, область сжимающих напряжений располагается в более глубоких слоях материала, что обеспечивает увеличение глубины разделяющей микротрещины наблюдаемое на эксперименте в 1,5 раза в сравнении с однолучевой обработкой. Однако данный способ, при неоспоримой эффективности, требует создания технологических комплексов, в состав которых входят CO₂-лазер и YAG-лазер одновременно. Стоимость таких установок зачастую очень велика, что увеличивает себестоимость производимой продукции.

Были выполнены расчеты термоупругих полей возникающих внутри стекла при управляемом лазерном термораскалывании с использованием в качестве источника излучения YAG-лазера, распределение интенсивности которого по глубине подчиняется закону Ламберта-Бугера-Бера. Геометрические размеры пучка, хладагента и скорость обработки взяты такие же, как и в случае применения CO₂-лазера. Схема расположения пучка и хладагента приведена на рисунке 1. Мощность лазерного излучения YAG-лазера полагалась равной 100Вт.

На рисунке 3 представлены кривые значений величины упругих напряжений вдоль линии обработки на различных глу-

бинах образца в определенный момент времени при использовании излучения YAG-лазера в процессе управляемого лазерного термораскалывания. Кривая 1 соответствует поверхности образца, кривая 2 – глубине 0.3 мм, кривая 3 – глубине 0.4 мм, кривая 4 – глубине 0.5 мм. Как видно из представленного на рисунке 3 распределения термоупругих полей, зона сжимающих напряжений за счет объемного поглощения материалом излучения YAG-лазера расположена в более глубоких слоях материала, что обеспечивает увеличение глубины разделяющей микротрещины. Однако величина этих напряжений на порядок ниже, чем в случае воздействия CO₂-лазером, кроме того на поверхности материала в зоне воздействия лазерного излучения образуется зона растягивающих напряжений, что свою очередь ухудшает контролируемость развития трещины. При этом величины растягивающих напряжений в области подачи хладагента едва хватает для инициализации микротрещины, что снижает вероятность зарождения микротрещины и не гарантирует повторяемость процесса. Однако следует заметить, что температура материала при этом не превышает 100°C. Таким образом увеличивая мощность лазерного излучения, мы можем добиться необходимых нам параметров для качественной реализации процесса управляемого лазерного термораскалывания. Однако мощные твердотельные лазеры на алюмоиттриевом гранате имеют низкий КПД по сравнению с газовыми лазерами и, как следствие, использование твердотельных лазеров для качественного разделения изделий из стекла не представляется экономически эффективным.

Существенный прогресс в технологии лазерного разделения изделий из стекла может быть достигнут при использовании СО-лазеров, позволяющих осуществлять эффективный объемный нагрев рабочей зоны. Спектр их эффективного излучения находится в диапазоне 5-6 мкм и располагается вблизи границы полосы прозрачности многих технических стекол. Согласно [8] длина поглощения излучения для стекла составляет около 300 мкм. Перспективность использования СО-лазеров отмечалась в [9]. Для качественного сравнения использования СО-лазеров для управляемого лазерного термораскалывания с другими типами лазеров были выполнены расчеты полей упругих напряжений при одинаковых параметрах геометрических размеров лазерного пучка и хладагента и скорости обработки материала. Мощность лазерного излучения полагалась равной 50 Вт. На рисунке 4 представлены кривые значений величины упругих напряжений вдоль линии обработки на различных глубинах образца в определенный момент времени при использовании излучения СО-лазера в процессе управляемого лазерного термораскалывания.

Кривая 1 соответствует поверхности образца, кривая 2 – глубине 0.2 мм, кривая 3 – глубине 0.3 мм, кривая 4 – глубине 0.4 мм, кривая 5 – глубине 0.5 мм. Как видно из представленного на рисунке 4 распределения полей упругих напряжений в зоне воздействия лазерного излучения формируется область больших сжимающих напряжений, причем максимальной величины они достигают на некоторой глубине в материале, что увеличивает контролируемость развития микротрещины. В зоне подачи хладагента возникают значительные растягивающие напряжения, величина которых превышает предел прочности стекла на растяжение. Необходимо отметить, что максимальные значения растягивающих напряжений в случаях использования излучения СО- и СО₂-лазеров практически одинаковы, что свидетельствует о равной вероятности зарождения микротрещины. Однако более глубокое расположение зоны сжимающих напряжений, обусловленное объемным поглощением материалом излучения СО-лазера, позволяет получить микротрещину большей глубины. При этом максимальная температура материала не превышает 300°C, что обеспечивает качественную реализацию процесса управляемого лазерного термораскалывания. Расчетные глубины микро-

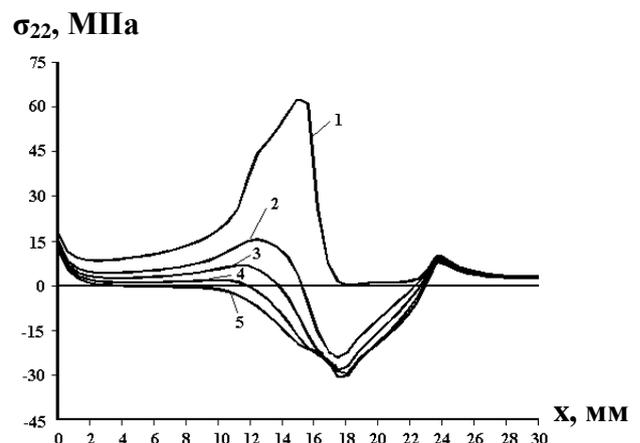


Рисунок 4 – Кривые значений величины упругих напряжений при использовании в качестве источника излучения СО-лазера

трещины. Однако более глубокое расположение зоны сжимающих напряжений, обусловленное объемным поглощением материалом излучения СО-лазера, позволяет получить микротрещину большей глубины. При этом максимальная температура материала не превышает 300°C, что обеспечивает качественную реализацию процесса управляемого лазерного термораскалывания. Расчетные глубины микро-

трещин в случае использования CO₂-лазера 0.25мм, CO-лазера – 0.4 мм. То есть глубина микротрещины в случае использования излучения CO-лазера более чем в полтора раза больше, чем в случае использования излучения CO₂-лазера. Увеличение глубины микротрещины позволяет облегчить докалывание изделий из стекла толщиной более 5 мм.

Таким образом, объемный нагрев стекла излучением CO-лазера уменьшая время передачи энергии в объем и, создавая более равномерный и управляемый прогрев по толщине материала, позволяет увеличить глубину микротрещины по сравнению с использованием излучения CO₂-лазера и обеспечить качественное разделение толстых стеклянных изделий. А более высокий КПД газовых лазеров, по сравнению с твердотельными, определяет высокую степень целесообразности применения CO-лазеров для процесса управляемого лазерного термораскалывания толстых стеклянных изделий.

Abstract: The authors analyze influence of laser radiation with various lengths of waves on process controlled laser termosplitting products from a silicate glass.

Литература

1. R. M. Lumley, Controlled separation of brittle materials using a laser, Am. Ceram. Soc. Bull., 48 (1969), 850–854.
2. С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнева, Ю. В. Никитюк, Комбинированное лазерное термораскалывание, Материалы IV Междунар. конф. Лазерная физика и спектроскопия, В 2 ч., 2, Гродно: ГрГУ, 1999, 177–179.
3. С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнева, Ю. В. Никитюк и др. Лазерное термораскалывание диэлектрических материалов, CERAMICS. POLISH CERAMIC BULLETIN. 2001. Vol. 65, P. 75-83.
4. И. К. Кикоин, В. Г. Аверин, Б. А. Аронзон Таблицы физических величин: Справочник, Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008с.
5. П.А. Вятлев, А.В. Захарченко, В.К. Сысоев и др. Технология эффективного управляемого лазерного термораскалывания диэлектрических материалов, Электронный журнал «ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ». 2003. с.1407-1421.
6. С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнева, Ю. В. Никитюк, Лазерная двухлучевая обработка материалов в производстве изделий электронной техники, INTERMATIC-2004, Москва, МИРЭА-ЦНИИ «Электроника», 1 (2004), 133–135.
7. С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнева, Ю. В. Никитюк, А. А. Середа Двухлучевое лазерное термораскалывание хрупких неметаллических материалов, «Оптический журнал», том 73, № 5, 2006, с. 62- 66.
8. В. С. Алейников, В. И. Масычев, Оптимизация технологических процессов термической обработки стекол в производстве электровакуумных изделий за счет их объемного нагрева излучением CO-лазера, Обзоры по электронной технике, сер. 7, Технология. Организация производства и оборудования, вып. 13.
9. В.К. Сысоев, А.В. Захарченко, П.А. Вятлев, К.Л. Лезвинский, Ю.Н. Булкин Сравнительный анализ применения излучения CO- и CO₂ лазеров для управляемого лазерного термораскалывания стекол для панелей LCD дисплеев, МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФИЗИКЕ ЭЛЕКТРОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ФИЭМ'05 Калуга, Россия, 2005.