

СВЕТОИНДУЦИРОВАННАЯ РЕЗКА СТЕКЛА

В. В. Бучанов¹, М. А. Казарян², Э. Н. Муравьев¹, В. И. Ревенко¹

Представлены теоретические и экспериментальные результаты по светоиндуцированному методу термораскалывания хрупких материалов на примере силикатных стекол. Развита физическая основа управляемого распределения тепловых полей, индуцируемых лазерным излучением, в результате которого происходят процессы сжатия и растяжения в материале, приводящие к раскалыванию материалов с нулевой шириной реза.

Ключевые слова: лазерная резка, лазерное термораскалывание, упругие напряжения.

Развитие новой техники (в частности, космической и авиационной) с высокими техническими и эксплуатационными характеристиками немислимо без создания новейших технологий. Современные скорости летательных аппаратов требуют использования материалов, способных выдерживать повышенные нагрузки. Широко используемое в настоящее время в конструктивных элементах летательных аппаратов органическое стекло имеет ряд недостатков. Прежде всего, к ним относятся горючесть и большое значение коэффициента теплового расширения. Кроме того, у оргстекла небольшой диапазон рабочих температур, не такая высокая твердость поверхности, как у силикатного стекла, то есть оргстекло в значительно большей степени подвержено мелким механическим повреждениям. Поэтому применение изделий из силикатного стекла выглядит очень перспективным. Они обладают повышенной стойкостью к внешним воздействиям. Но силикатное стекло гораздо труднее обрабатывать, придавать ему нужную форму и свойства. Наиболее перспективным методом резки силикатных стёкол на наш взгляд является метод лазерного управляемого термораскалывания (ЛУТ) [1], так как он обеспечивает высокую прочность, точность и скорость реза стеклоизделий.

Рассмотрим одну из необычных областей применения лазеров – обработку прозрачных и полупрозрачных неметаллических материалов. Сюда можно отнести лазерную резку органических и неорганических стёкол, резку твёрдых кристаллов (например,

¹ ОАО «Научно-исследовательский институт технического стекла», 117218 Россия, Москва, ул. Кржижановского, 29/1.

² ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

алмазов), сверление в них отверстий, резку их на тонкие пластины, резку тонких (менее 0.5 мм) стёкол, которые почти невозможно разрезать механическим инструментом, снятие покрытий со стёкол без нарушения целостности последних.

Резка силикатного плоского флоат-стекла лазерами осваивается лишь несколькими научными и производственными учреждениями и предприятиями. Основным методом лазерной резки силикатных стёкол является вышеуказанный метод лазерного управляемого термораскалывания, заключающийся в том, что в стекле в результате нагрева его приповерхностного слоя лазерным лучом (например, лучом CO₂-лазера) и последующего охлаждения хладагентом (например, парами воды) образуются растягивающие напряжения, которые при превышении прочности стёкол образуют в нём поверхностную трещину и после приложения механических усилий (доламывания) происходит разъединение частей стекла.

Резка 3D-стеклоизделий вышеописанным способом затруднена и её необходимо производить слабо поглощающимся в материале лазерным излучением. При этом технология и физические процессы существенно отличаются от лазерной резки с поверхностным поглощением излучения. Во втором случае задачу можно рассматривать как влияние движущегося источника энергии на поверхность материала. В случае ЛУТ, вследствие такого воздействия на поверхности материала создаётся, как правило, несквозная трещина, которая при механическом воздействии (доламывании) приводит к разделению материала. При этом в процессе доламывания оставшаяся часть толщины материала слабо “помнит” то, каким способом была получена затравочная трещина. При резке слабо поглощающимся излучением материал прогревается по всей толщине и за счёт выбора направления луча, отражённого от находящегося под материалом зеркала, и за счёт выбора места подачи хладагента можно создать условия для начала образования управляемой трещины на верхней, на нижней или одновременно на обеих сторонах. Таким образом, в данном случае создаются широкие возможности для создания в области разделения материала управляемого теплового поля (а значит и поля упругих напряжений), которое позволит при термораскалывании материала получать требуемый профиль торца.

При механической резке крупногабаритных 3D-стеклоизделий из-за малой толщины стёкол (3 мм) и больших габаритов стекло может развалиться в руках оператора. При лазерной резке его крепят в специальном фиксирующем устройстве на вакуумных присосках. Для резки трёхмерного изделия удобно использовать шестиосный робот-

манипулятор, на выходном колене которого укреплен объектив, соединенный с коллиматорным устройством оптического кабеля волоконного лазера.

Пять осей робота предназначены для нахождения нужной точки в трёхмерном пространстве и для направления лазерного пучка перпендикулярно поверхности разрезаемого стекла, а шестая ось управляет закреплённым на оконечном звене робота оптико-механическим блоком управления конфигурацией лазерных пятен и зон охлаждения на стекле. Это необходимо, например, для направления длинной оси овального пятна облучения параллельно касательной к линии реза, управления движением второго лазерного пятна, местом действия на стекло хладагента и др. Стеклоизделие предварительно обрезают любым (например, механическим) способом, оставляя технологический припуск, а затем робот двигает объектив по заданной программой траектории и лазерным сфокусированным пучком отделяет технологический припуск от основного изделия [2].

В наших экспериментах лазерное термораскалывание происходило под воздействием иттербиевого лазера, излучение которого проходило через стекло с малым поглощением. Поэтому мы разработали трехмерную модель термоупругости, которая учитывает излучение и объемное поглощение. Уравнение теплопроводности записывалось в движущейся системе координат. Предполагалось, что начало координат движется вдоль поверхности стекла с вектором скорости \vec{V} . Тогда уравнение для температуры $T(x, y, z)$ можно представить в виде:

$$c \frac{dT}{dt} = \text{div}(\sigma \text{grad} T) - c\vec{V} \cdot \text{grad} T + q(x, y, z),$$

где c – теплоемкость стекла, σ – коэффициент теплопроводности, $q(x, y, z)$ – тепловыделение в стекле в результате поглощения лазерного излучения. Выражение для тепловыделения представлялось в виде:

$$q(x, y, z) = e^{-kz} P S(x, y, z),$$

где k – коэффициент поглощения излучения в стекле, P – мощность лазерного излучения, $S(x, y, z)$ – нормированное на единицу распределение излучения в плоскости с координатой z .

Для постановки задачи термоупругости использовалось известное уравнение:

$$\mu \Delta^2 \vec{U} + (\lambda + \mu) \text{grad} \text{div} \vec{U} - (3\lambda + 2\mu) \alpha_T \text{grad} T = 0,$$

где \vec{U} – вектор перемещения, μ и λ – коэффициенты Ляме, α_T – коэффициент линейного теплового расширения. Компоненты тензора упругих напряжений определяются

через компоненты вектора смещения и температуру, исходя из соотношений Дюгамеля–Неймана, основанных на обобщенном законе Гука для трехмерных упругих тел.

Облучение листового стекла лазерным излучением иттербиевого лазера индуцирует появление областей растягивающих и сжимающих напряжений в объеме и на поверхности стекла. Распределение этих напряжений зависит от многих факторов, но прежде всего от конфигурации и размеров пятна облучения, толщины стекла, скорости движения пятна облучения во время резки. С изменением мощности пропорционально изменяется величина напряжений, но пространственная картина распределения напряжений остается неизменной (это справедливо в рамках линейной теории термоупругости, когда физические свойства материала предполагаются независимыми от температуры) [3]. Было показано также, что зависимость максимально допустимой скорости резки оконного стекла близка к прямо пропорциональной от мощности излучения иттербиевого лазера в широком диапазоне его мощностей – 300–30000 Вт.

Сравнительный анализ показал достаточно хорошее совпадение экспериментальных результатов с теоретическими расчетами.

Проведенная в данной работе процедура по обработке крупногабаритных силикатных стёкол привела к созданию ряда перспективных лазерных технологий: автоматизированной резке 3D-стеклоизделий [4], получению притуплённых граней торцов в едином процессе с резкой [5], резке крупных плоских стеклоизделий из стекла тонких номиналов (до 0.2 мм), лазерному способу снятия тонких токопроводящих покрытий с крупногабаритных гнутых стёкол [6] и др. Развивая и дальше это направление лазерной обработки стекла, можно надеяться на значительное улучшение эксплуатационных параметров стёкол для изделий конструкционной оптики.

Преимущество лазерной резки 3D-стеклоизделий перед механической заключается в возможности полной автоматизации процесса резки, точности геометрии вырезаемой фигуры, прочности торцов изделия, вытекающей из физических процессов, происходящих при лазерной резке, отсутствии острых граней, идентичности всех последующих вырезаемых деталей.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. С. Кондратенко, *Лазерное управляемое термораскалывание хрупких материалов* (М., МГУПИ, 2007).

- [2] Э. Н. Муравьев, В. И. Ревенко, В. Ф. Солинов и др., в сборнике трудов симпозиума “Лазеры на парах металлов”, с. 56, Лоо, Ростов-на-Дону, 2012 (Ростов-на-Дону, Ростовский университет, 2014).
- [3] В. В. Бучанов, М. А. Казарян, Е. Ф. Кустов и др., в сборнике трудов симпозиума “Лазеры на парах металлов”, с. 23, Лоо, Ростов-на-Дону, 2014 (Ростов-на-Дону, Ростовский университет, 2014).
- [4] В. Ф. Солинов, Е. Ф. Солинов, Э. Н. Муравьев и др., “Способ лазерной резки хрупких неметаллических материалов и устройство для его осуществления”, Патент РФ №2528287 от 17.07.2014.
- [5] В. И. Ревенко, В. Ф. Солинов, Е. Ф. Солинов и др., “Способ лазерной резки стекла”. Патент РФ № 2574634 от 13.05.2014.
- [6] В. В. Бучанов, Э. Н. Муравьев, И. С. Курчатов и др., “Устройство для удаления покрытий неметаллических материалов”. Патент РФ на полезную модель №147137 от 27.10.2014.

Поступила в редакцию 13 июля 2017 г.