

Особенности лазерного термораскалывания при совместном воздействии на поверхность материала лазерного излучения, хладагента и потока горячего воздуха

С. В. ШАЛУПАЕВ, Ю. В. НИКИТЮК, А. А. СЕРЕДА, И. М. КАМОРНИКОВ, А. С. ПОБИЯХА

В настоящее время разработан ряд методов прецизионной лазерной обработки хрупких неметаллических материалов, к которым относятся сквозное лазерное термораскалывание, управляемое лазерное термораскалывание, параллельное и асимметричное лазерное термораскалывание, термораскалывание изделий трубчатой формы и двулучевое лазерное термораскалывание [1-2]. Одним из наиболее эффективных методов высокоточного разделения хрупких неметаллических материалов является управляемое лазерное термораскалывание (УЛТ), отличительная особенность которого заключается в том, что разделение материала на части заданной формы происходит вследствие образования микротрещины, формируемой в результате поверхностного нагрева материала лазерным излучением и последующего охлаждения зоны нагрева хладагентом. К основным преимуществам управляемого лазерного термораскалывания относятся высокие точность разделения и скорость обработки, безотходность [3].

Однако для технологических процессов лазерного разделения хрупких неметаллических материалов, основанных на использовании управляемого лазерного термораскалывания, характерен ряд особенностей, затрудняющих их широкое промышленное внедрение. Одним из существенных недостатков УЛТ является низкая надежность процесса разделения в первую очередь при режимах с малым расстоянием от задней границы лазерного пучка до переднего фронта зоны охлаждения. В результате анализа процесса УЛТ удалось выявить несколько причин нестабильности трещинообразования. Одной из них является существенное влияние хладагента, проникающего в зону лазерного воздействия, на теплофизические условия в ней, чем обусловлены частые срывы процесса развития разделяющей микротрещины. Следствием этого же обстоятельства является то, что при УЛТ не обеспечивается надежное разделение, если разделяющие микротрещины необходимо наносить на небольшом удалении друг от друга, что существенно при получении миниатюрных изделий. Причина этого заключается в том, что при попадании хладагента, оставшегося после нанесения предыдущих микротрещин на траекторию воздействия лазерного пучка часто происходит прекращение развития очередной разделяющей микротрещины.

В соответствии с [4] при попадании жидкости на поверхность нагретого стекла на ней образуется пленка пара. При последующем охлаждении стекла толщина пленки уменьшается и жидкость из стадии пленочного кипения переходит в стадию пузырькового кипения, а затем происходит ее конвективное охлаждение. При этом пленочное и пузырьковое кипение характеризуются низким коэффициентом теплоотдачи, который определяется низкой теплопроводностью пара. В этой же работе отмечается, что процесс теплообмена при охлаждении поверхности нагретого стекла распыленной жидкостью определяется в первую очередь режимом обтекания хладагента поверхности материала, которое сопровождается образованием тонкой жидкостной пленки, постоянно обновляемой вследствие поступления новых порций хладагента. При определенных условиях (в первую очередь при достаточно высокой скорости подачи хладагента) жидкость на поверхности не успевает нагреваться до температуры кипения, при этом условия теплообмена на поверхности определяются в основном скоростью течения жидкости по поверхности. При большой скорости движения распыленной жидкости по поверхности стекла велико значение коэффициента теплоотдачи. Немаловажно

то, что стабильность теплообмена также зависит от скорости движения жидкости: при малых скоростях режим теплоотдачи неустойчив, а при больших скоростях – устойчив и возможна его регулировка.

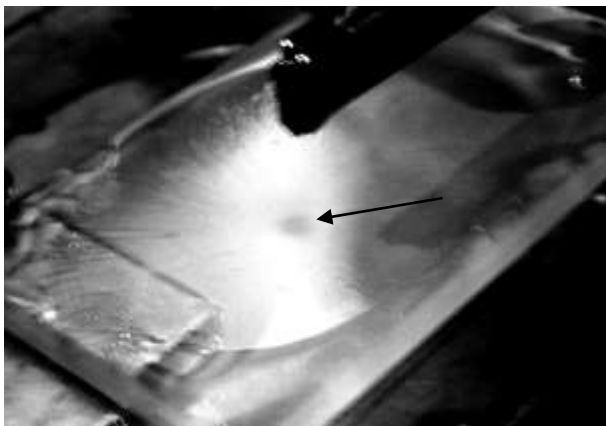


Рисунок 1 – Внешний вид стеклопластины под воздействием хладагента (Стрелкой отмечена зона стабильного интенсивного охлаждения, которую окружает пленка из жидкости, формируемая в результате растекания хладагента по обрабатываемой поверхности)

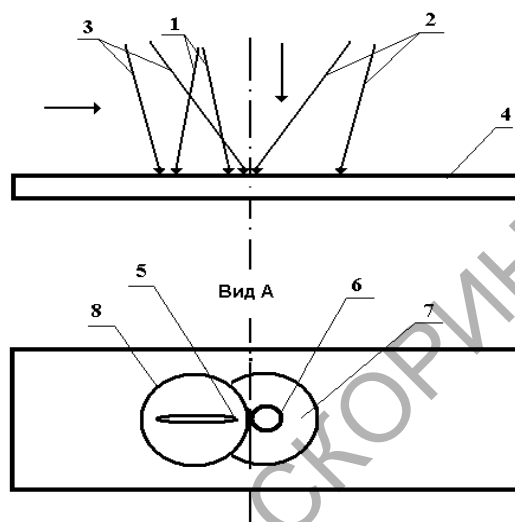


Рисунок 2 – Схема взаимного расположения зон воздействия лазерного пучка, зоны охлаждения и зоны нагрева потоком горячего воздуха

Таким образом, важным обстоятельством является то, что на охлаждаемой поверхности материала вследствие воздействия хладагента кроме зоны со стабильным интенсивным охлаждением в результате его растекания по обрабатываемой поверхности образуется еще и зона с нестабильным слабым охлаждением (рисунок 1). При этом предварительное охлаждение нагретых лазерным излучением участков материала часто происходит в этой зоне и характеризуется нестабильностью и низкой скоростью охлаждения вследствие недостаточно высокой скорости движения жидкости по поверхности материала, и поэтому негативно сказывается на надежности процесса трещинообразования.

Вышеперечисленные недостатки обуславливают низкую эффективность использования рассматриваемой технологии, что в свою очередь потребовало дополнительных исследований данного процесса и разработку схемы, обеспечивающей повышение надежности и качества разделения хрупких неметаллических материалов. В результате проведения комплекса исследовательских работ была обоснована целесообразность совместного воздействия лазерного излучения, хладагента и потока горячего воздуха на поверхность материала.

Взаимное расположение зоны воздействия лазерного пучка, зоны, охлаждаемой хладагентом, и зоны нагреваемой потоком горячего воздуха, которое было использовано при проведении экспериментов, схематически показано на рисунке 2 [5]. Позицией 1 отмечен лазерный пучок, позицией 2 – хладагент, позицией 3 – поток горячего воздуха, позицией 4 – обрабатываемое изделие из хрупкого неметаллического материала, позицией 5 – сечение лазерного пучка в плоскости обработки, позицией 6 – зона интенсивного охлаждения хладагентом, позицией 7 – пленка из жидкости растекающегося хладагента, позицией 8 – зона, воздействия потока горячего воздуха. Стрелкой отмечено направление перемещения изделия.

Разделение хрупких неметаллических материалов в соответствии с предложенной схемой обработки осуществляется в результате последовательного выполнения следующих операций. Исходная заготовка материала размещается на координатном столе. Наносится дефект в начале линии обработки. Затем лазерный пучок направляется на отрезок контура обработки с нанесенным дефектом. Далее координатный стол перемещает изделие по линии обработки относительно лазерного пучка, устройства подачи подогретого воздуха и форсун-

ки. Излучение лазерного пучка, поглощаясь в поверхностном слое, осуществляет нагрев пластины. При этом хладагент подается в зону, предварительно нагретую, как лазерным излучением, так и потоком горячего воздуха, а сама зона лазерного воздействия размещается в зоне воздействия потока горячего воздуха. Таким образом, стеклянная пластина одновременно нагревается двумя поверхностными источниками тепла, а именно излучением CO_2 -лазера и потоком горячего воздуха, а затем охлаждается хладагентом.

В ходе экспериментов в образцах из стекла марки МЗ толщиной 3-5 мм наносились параллельные разделяющие надрезы на расстоянии 5 мм друг от друга. В работе был использован лазер ИЛГН 802 с длиной волны излучения $\lambda = 10,6$ мкм, мощность излучения которого составляла 40 – 60 Вт. При разделении стекла лазерное излучение фокусировалось в эллиптические пучки с большой осью $A = 6 - 12$ мм и малой осью $B = 0,5 - 2$ мм. Поток воздуха перед подачей в зону обработки нагревался до температуры 200 – 500 °С. Скорость резки образцов составляла 10 – 30 мм/с. В ходе экспериментальных исследований было установлено, что потоком горячего воздуха удаляется хладагент, находящийся в зоне воздействия лазерного пучка, а также предотвращается проникновение в нее новых порций хладагента, тем самым обеспечивается стабилизация теплофизических условий в зоне лазерного воздействия.

Для выяснения особенностей процесса УЛТ при совместном воздействии лазерного излучения, хладагента и потока горячего воздуха на поверхность материала было выполнено конечно-элементное решение задачи о распределении термоупругих полей. Расчеты были проведены с использованием свойств силикатного стекла, приведенных в [1] и следующих параметров лазерного пучка: большая ось $A = 6 \cdot 10^{-3}$ м, малая ось $B = 1,4 \cdot 10^{-3}$ м, мощность излучения $P = 40$ Вт, диаметр сопла устройства подачи горячего воздуха $D = 3$ мм, расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности $Z = 10$ мм. Температура горячего воздуха составляла 250 °С. Зона интенсивного охлаждения формировалась в форме круга диаметром 3 мм. Расчеты проводились для пластины с геометрическими размерами $24 \times 12 \times 3$ мм. Скорость перемещения обрабатываемого изделия относительно лазерных пучков считалась равной 10 мм/с.



Рисунок 3 – Распределение температуры ($^{\circ}\text{C}$) при воздействии на поверхность материала лазерного излучения, потока горячего воздуха и хладагента

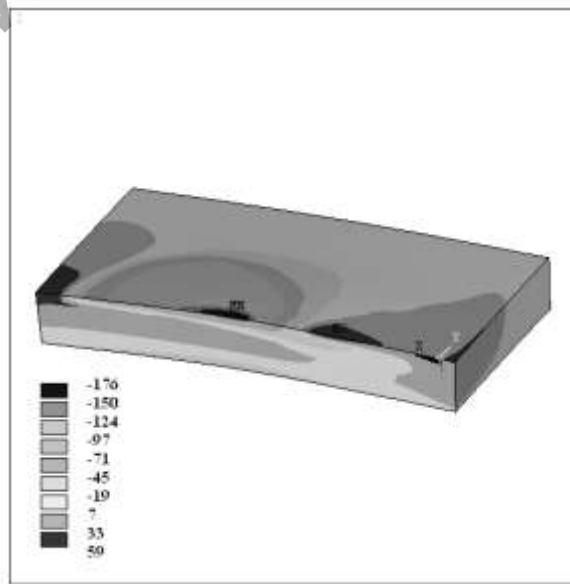


Рисунок 4 – Распределение напряжений σ_{yy} (МПа) при воздействии на поверхность материала лазерного излучения, потока горячего воздуха и хладагента

На рисунке 3 представлены результаты расчета температурных полей, формируемых в исследуемом образце в результате обработки по схеме, приведенной на рисунке 1, а на ри-

сунке 4 изображено соответствующее распределение напряжений σ_{yy} , действующих перпендикулярно плоскости разделения.

Как видно на рисунке 3, при совместном воздействии на поверхность образца лазерного излучения, хладагента и потока горячего воздуха, кроме локальной зоны высоких температур (около 500 °С), обусловленной воздействием лазерного излучения, на поверхности материала существует более широкая зона с температурой в диапазоне от 200 до 250 °С, появление которой связано с воздействием потока горячего воздуха.

Из рассмотрения рисунка 4 следует, что использование дополнительного воздействия потока горячего воздуха не приводит к принципиальным отличиям в пространственном распределении зон напряжений растяжения и сжатия по сравнению со случаем управляемого лазерного термораскалывания. Это позволяет сделать вывод о реализации в данном случае одинаковых механизмов формирования и развития разделяющей микротрещины.

Кроме расчетов термоупругих полей, формируемых при совместном воздействии на поверхность материала лазерного излучения, хладагента и потока горячего воздуха, были выполнены аналогичные расчеты для вариантов обработки, отличающихся от предыдущего отсутствием воздействия потока горячего газа.

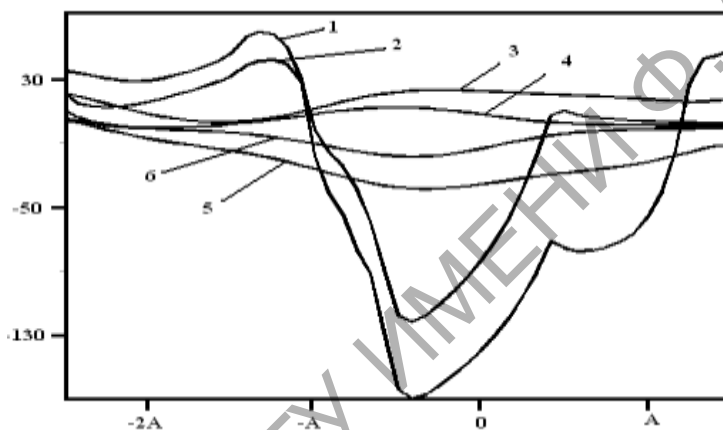


Рисунок 5 – Зависимость напряжений σ_{yy} от расстояния до центра лазерного пучка ($Y=0$ мм), МПа
 1 – $Z=0$, 3 – $Z=H/2$, 5 – $Z=-H$ (УЛТ с дополнительным воздействием потока горячего воздуха), 2 – $Z=0$, 4 – $Z=H/2$, 6 – $Z=-H$ (УЛТ без воздействия потока горячего воздуха)

Таким образом, использование дополнительного воздействия потока горячего воздуха обеспечивает не только удаление из зоны воздействия лазерного излучения пленки хладагента, формируемой в результате растекания жидкости по обрабатываемой поверхности и препятствует проникновению новых порций хладагента в эту зону, но и обеспечивает повышение величины растягивающих напряжений за счет предварительного нагрева, что в свою очередь повышает стабильность развития микротрещины. Отметим, что поток горячего воздуха, удаляя растекающийся хладагент, предотвращает предварительное слабое охлаждение нагретой поверхности материала в зоне 7 (см. рисунок 5) до начала интенсивного охлаждения в зоне 8. Соответствующие оценочные расчеты показали, что предотвращение охлаждения в зоне 7 приводит к повышению результирующих напряжений растяжения на 7-8%.

Abstract. The scheme of controlled laser thermo-splitting, combining joint impact on a surface of a material of laser emission, coolant and hot air jet is presented in the paper. Such combination ensures substantial increase of stability of initialization and development of dividing laser micro-crack process. Stabilization of formation process of a dividing micro-crack according to results of a numerical modeling is achieved not only at the expense of coolant substance removal from a zone of

laser action, but also at the expense of a preliminary warming-up of the worked material causing increase of tensile stresses value in the zone of coolant action.

Литература

1. Мачулка, Г. А. Лазерная обработка стекла / Г. А. Мачулка. – М.: Сов. радио, 1979. – 136 с.
2. Двулучевое лазерное термораскалывание хрупких неметаллических материалов / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершневу, Ю. В. Никитюк, А. А. Середа // Оптический журнал – 2005. – Т. 73, № 5. – С. 62 – 66.
3. Кондратенко, В. С. Лазерное управляемое термораскалывание хрупких материалов: курс лекций / В. С. Кондратенко. – М.: МГАПИ, – 2004. – 88 с.
4. Богуславский И. А. Высокопрочные закаленные стекла / И. А. Богуславский. – М.: Издательство литературы по строительству, 1969. – 208 с.
5. Способ разделения хрупких неметаллических материалов под действием термоупругих напряжений: пат 10022 Респ. Беларусь, МПК С 03В 33/00 / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершневу, Ю. В. Никитюк, А. А. Середа; заявитель Гом. гос. ун-т им. Ф. Скорины – № а 20050697; заявл. 11.07.05;

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступило 15.10.08