

УДК 537

В.И. Букатый, В.О. Перфильев

Расчет температуры на поверхности стекла при лазерном термораскалывании излучением CO₂-лазера

При термораскалывании лазерный луч достаточной мощности перемещается вдоль поверхности стекла и нагревает его до температуры, превышающей предел термостойкости, но не доходящей до значения температуры стеклования [1]. Тогда при определенных условиях на некотором расстоянии от движущегося луча возникает трещина, которая следует за лучом, в результате чего стекло разделяется по описываемому лазерным лучом контуру. Лазерный луч как бы ведет за собой трещину, разделяющую листовое стекло.

Уровень мощности лазерного излучения, необходимый для обеспечения управляемого термораскалывания листового стекла, можно получить, вычислив температуру, до которой нагревается поверхность стекла под воздействием лазерного излучения.

Так как стекло обладает большим показателем поглощения излучения CO₂-лазера и для него выполняется условие [2] (где δ – глубина проникновения излучения в материал,

μ – показатель поглощения излучения в среде, a – температуропроводность материала, t – время воздействия излучения на материал), то можно считать, что воздействие излучения CO₂-лазера на стекло проявляется в поглощении энергии этого излучения в поверхностном слое стекла. Это приводит к резкому повышению колебательной энергии компонентов молекулярной структуры. В результате этого поверхностный слой материала прогревается, а последующие слои материала разогреваются в основном за счет теплопроводности. Таким образом, температура на поверхности стекла может быть вычислена путем решения уравнения теплопроводности.

В общем виде уравнение теплопроводности можно записать в виде [3]

(1)

где T , соответственно плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности, температура материала. Обычно полагается, что теплофизические характеристики стекла не зависят от температуры. Поэтому нами также используются средние значения теплофизических характеристик в интересующем нас диапазоне температур. В этом случае формула (1) примет вид

(2)

где $a = \lambda / \rho c$ с температуропроводность материала.

Решение этого уравнения для мгновенного воздействия бесконечно тонкого кольцевого источника, имеющего энергию W , на полубесконечную плоскость, имеет вид [1]

(3)

где r_0 – радиус кольцевого источника, $T(r, z, t)$ – температура как функция глубины z , отсчитываемой от поверхности, радиального расстояния r от центра кольца и времени t с момента выделения теплового импульса, I_0 – функция Бесселя нулевого порядка от мнимого аргумента. Исходная физическая модель состоит из полубесконечной плоскости, подвергаемой воздействию лазерного излучения, связанного с цилиндрической системой координат. Так как стекло обладает слабой теплопроводностью, то можно ограничиться случаем полубесконечной плоскости.

В соответствии с [4], распределение интенсивности лазерного излучения по сечению луча описывается следующим выражением:

(4)

где m и n – целые числа, называемые поперечными индексами; I_m^n – обобщенные полиномы Лагге-

ра; $r_0 = (k/ \dots)^{1/2} (-AB/CD)^{1/4}$ (где k – длина волны лазерного излучения, а A, B, C, D – элементы лучевой матрицы); r, z – цилиндрические координаты.

В отличие от [1], где приводится расчет для гауссова пучка, в нашем случае используется кольцевой тип колебаний TEM_{20} (сечение лазерного пучка в этом случае имеет вид двух концентрических колец с пятном посередине [5, с. 84–95]). Тогда, переходя к плотности лазерного излучения, получим

$$\dots \quad (5)$$

Энергию бесконечно тонкого кольцевого источника W можно записать в виде

$$\dots \quad (6)$$

Подставляя (5) в (6), а затем в (4), интегрируя получившееся выражение по r и переходя к движущейся системе координат, получим

$$\dots \quad (7)$$

где

$$\dots, \quad (8)$$

$$\dots, \quad (9)$$

$$\dots, \quad (10)$$

$$\dots, \quad (11)$$

$$\dots \quad (12)$$

Здесь v – скорость перемещения лазерного луча.

Нас интересует стационарный случай, для которого необходимо проинтегрировать (7) при условии \dots . При расчете режима термораскалывания можно не вычислять температурное поле в общем виде, а вычислить температуру в точке на оси луча ($z = 0, r = 0$) и внешнем кольце ($z = 0, r = r_0$). Та температура, что окажется больше, будет определять градиент температуры, приводящий к термораскалыванию [1] (при условии, что процесс происходит достаточно быстро).

Чтобы выразить входящий в (8–12) параметр плотности мощности через полную мощность лазерного излучения P , запишем выражение

$$\dots \quad (13)$$

Подставляя в (7) $z = 0, r = 0$ и интегрируя по t от 0 до ∞ , а затем подставляя \dots из (13),

получим

(14)

Подставляя в (7) $z = 0$ и интегрируя по t от 0 до , получим

(15)

Интегралы вычислялись численно на ЭВМ с помощью квадратурных формул Ньютона- Котеса [6].
Оценим численно (14-15). При значениях параметров $a = 4,7 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, $(= 0.87 \text{ Вт}/\text{м}^2\text{К}$, $(= 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}/\text{с}$, $r = 10^{-3} \text{ м}$, получим, что $T(0,0) = 72,4 \cdot P \text{ }^\circ\text{C}$, а $T(0,) = 80,7 \cdot P \text{ }^\circ\text{C}$ (здесь P измеряется в ваттах). Таким образом температура в центре луча меньше температуры на внешнем кольце.

Необходимость вычисления температуры была вызвана тем, что в [1] использовался некорректный подход при решении данной задачи. В выражении (6) использовалась плотность мощности лазерного излучения для гауссова пучка, затем в (13) подставлялась плотность мощности лазерного излучения для колебаний типа TEM_{01} , а эксперименты проводились с лазерным излучением для колебаний типа TEM_{20} . В результате авторы [1] значительно упростили решение, но в нем присутствует только слагаемое $T_5(r, z, t)$. Наш расчет температуры на поверхности листового стекла при лазерном термораскалывании излучением CO_2 -лазера с типом колебаний TEM_{20} показал,

что $T(0,0)$ и $T(0,)$ различаются незначительно. Однако, если температура $T(0,0)$ определяется только $T_5(r, z, t)$, то для $T(0,)$ все слагаемые (7) вносят существенный вклад в значение температуры.

Литература

1. Мачулка Г.А. Лазерная обработка стекла. М., 1979.
2. Григорьянц А.Г., Соколов А.А. Лазерная обработка неметаллических материалов. Кн. 4. М., 1988.
3. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М., 1967.
4. Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения. М., 1979.
5. Бирнбаум Дж. Оптические квантовые генераторы. М., 1967.
6. Бахвалов Н.С. Численные методы. М., 1975.