

УДК 537.9

Оптимизация процессов лазерной резки алмазов на основании результатов математического моделирования

А. А. ХМЫЛЬ¹, А. Н. КУПО², А. Е. ШЕРШНЕВ²

На основании модели движущегося теплового источника предложены оптимальные технологические параметры лазерной резки алмазов. Установлены значения плотности мощности теплового источника и скорости его движения по поверхности, согласующиеся с экспериментом.

Ключевые слова: лазерная размерная обработка, лазерная резка алмазов, математическое моделирование, температурное поле.

Based on the model of a moving heat source there are suggested optimal technological parameters of diamond laser cutting. There are set the values of power density of a heat source and the speed of its movement on the surface in agreement with the experiment.

Keywords: laser bargaining processing, diamond laser cutting, mathematical modelling, temperature field.

Введение

Лазерная размерная обработка алмазного сырья включает в себя операции лазерной резки по прямолинейному контуру (распиловка) и резки по заданному контуру (обточка). Лазерная обточка позволяет получать алмазную заготовку под любые заданные формы. Использование автоматизированной лазерной обработки в сочетании с компьютерной оптимизацией формы и размеров обрабатываемого контура открывает реальную перспективу существенного повышения эффективности обработки ювелирных алмазов и экономии сырья [1].

Эффективность лазерного нагрева зависит не только от параметров воздействующего излучения, но также от свойств обрабатываемого материала, который должен обладать достаточной поглощательной способностью для излучения данной длины волны. На практике данная проблема часто решается путем покрытия поверхности алмаза слоем вещества с низкой теплопроводностью и большим коэффициентом поглощения. Лазерное излучение выделяется в тонком слое покрытия, затем тепло от покрытия по механизму теплопроводности передается алмазу. Использование покрытия необходимо только на начальном этапе. В дальнейшем на поверхности алмаза в процессе воздействия лазерных импульсов формируется графитсодержащая пленка, которая поглощает энергию лазерного излучения и служит источником тепла для кристалла алмаза.

Повысить эффективность лазерной резки возможно, выбрав параметры лазерного излучения таким образом, чтобы обеспечивалась графитизация поверхности не только в слое материала, непосредственно следующем за подвергаемым лазерному воздействию, но и на «соседней дорожке» сканирования. В этом случае представляется возможным избежать лишних «проходов», тем самым существенно сэкономить время обработки. Прогнозирование оптимальных параметров технологического процесса может быть реализовано методом математического моделирования.

Моделирование

Как уже было указано, для оптимизации процессов лазерной обработки алмазов первостепенную роль играет информация о температурных полях, формируемых в обрабатываемых лучом лазера образцах.

Знание температурного поля, формируемого в алмазе при воздействии излучения лазера, позволяет определить критические плотности потока, требуемые для достижения за данный промежуток времени в некоторой точке поверхности или объема материала критиче-

ской температуры. В частности, можно определить плотность потока, приводящую к разрушению материала (достижение температуры плавления) или к графитизации. В дальнейшем будем полагать, что разрушение материала с последующим выносом его из зоны обработки (плавление) происходит при достижении температуры ≈ 4000 К, а процесс графитизации начинается при достижении температуры ≈ 2300 К [1].

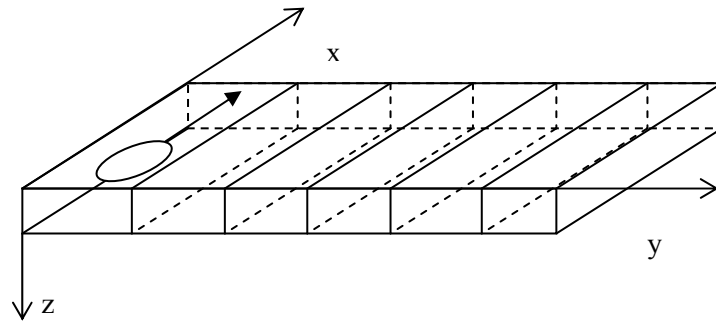


Рисунок 1 – Модель движущегося теплового источника

Для расчета температурного поля необходимо решить краевую задачу теплопроводности в движущейся системе координат (см. рисунок 1) для гауссова распределения энергии лазерного пучка в пространстве [2]:

$$\frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} - \frac{v_x \cdot c \cdot \rho}{\lambda} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$-\lambda \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = I_0 \cdot e^{-k \cdot (x_0^2 + y_0^2)} \quad (2)$$

$$T(\infty, y, z, t) = T(x, \infty, z, t) = T(x, y, \infty, t) = T(x, y, z, 0) = T_0 \quad (3)$$

Здесь T – температура мишени, λ – коэффициент теплопроводности, c – теплоемкость, ρ – плотность материала, I_0 – плотность мощности поверхностного источника, k – коэффициент сосредоточенности в показателе экспоненты функции Гауса. Теплообмен с окружающей средой (воздух) не учитывается в силу существенной малости. Вектор скорости движения зоны лазерного воздействия направлен вдоль оси x .

Как известно [2], задача в такой постановке имеет решение в квадратурах, достаточно неудобное для анализа. Для того чтобы избавиться от этих сложностей, используется метод перехода от подвижной системы координат к неподвижной. Такой подход позволяет получить решение системы (1)–(3) в виде суперпозиции [3]:

$$T = T_0 + \frac{I_0 \cdot \sqrt{a}}{4 \cdot \sqrt{\pi} \cdot k \cdot \lambda} \cdot \sum_{n=0}^N F(x_n - v_x \cdot t, y_n, z, t), \quad (4)$$

где

$$F_N = \sum_{n=0}^N F(x_n - v_x \cdot t, y_n, z, t) = \int_0^t \sum_{n=0}^N \exp \left\{ \left[-\frac{y_n^2 + (x_n - \omega \cdot v_x)^2}{4 \cdot [a \cdot (t - \omega) + 1/(4 \cdot k)]} - \frac{z^2}{4 \cdot a \cdot (t - \omega)} \right] \times \right. \\ \left. \times \frac{d\omega}{[a \cdot (t - \omega) + 1/(4 \cdot k)] \cdot \sqrt{t - \omega}} \right\} \quad (5)$$

Выражение (5) позволяет получить количественные зависимости температурного поля мишени от любых параметров сканирующего источника и любых значений теплофизических констант мишени.

Представленная модель применима для оценки температуры вблизи зоны лазерного воздействия (линии реза) на расстоянии, равном нескольким диаметрам лазерного пятна на поверхности.

На рисунке 2 представлен график распределения термодинамической температуры вдоль координаты y по истечении времени $\tau = 1$ с, что соответствует протяженности зоны обработки $\Delta x = 6 \cdot 10^{-3}$ м. Количество обработанных дорожек $n = 4$. Зависимости теплофизических характеристик алмаза от термодинамической температуры T были учтены в линейном приближении: коэффициент теплопроводности $\lambda = 628 - 0,148 \cdot T$ Вт/м·К, удельная теплоемкость $c = 344 + 1,445 \cdot T$ Дж/кг·К. Плотность $\rho = 3520$ кг/м³. Для расчета были использованы следующие технологические параметры: скорость перемещения лазерного луча $v = 6 \cdot 10^{-3}$ м/с, плотность мощности лазерного источника варьировалась в пределах порядка $I_0 = 10^{10} \div 10^{11}$ Вт/м², радиус лазерного пятна $r = 5 \cdot 10^{-5}$ м.

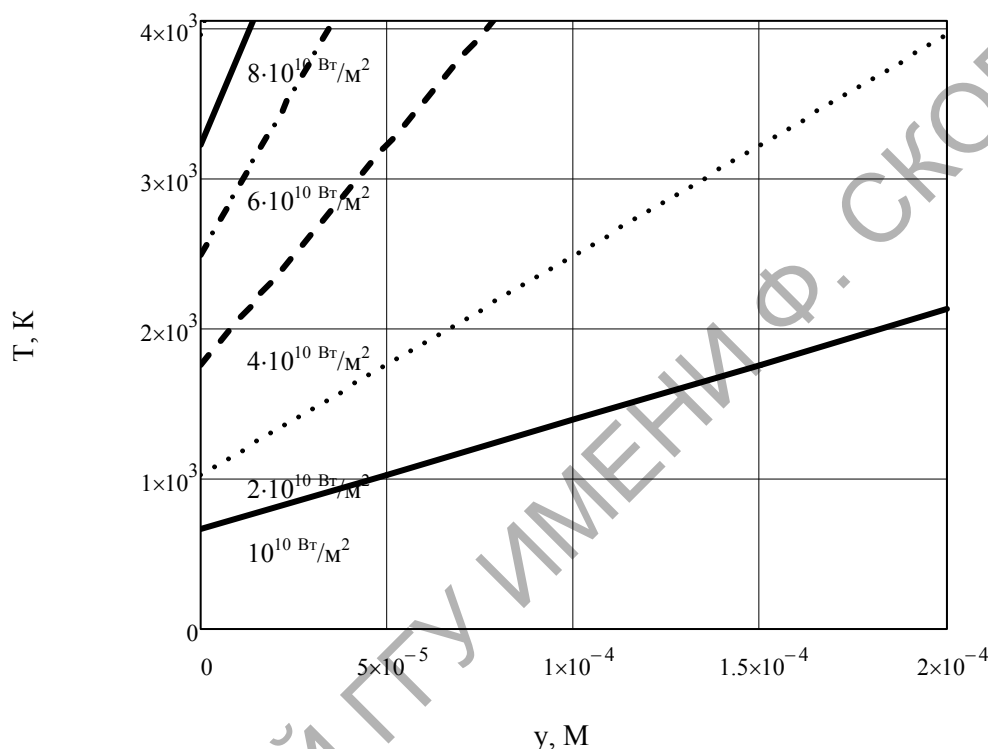


Рисунок 2 – Распределение термодинамической температуры по координате y для различных значений плотности мощности источника

Из приведенного на рисунке 2 графика видно, что значения температуры существенно зависят от плотности мощности формируемого лазером теплового источника. При этом, для плотности мощности $I_0 = 10^{10}$ Вт/м² необходимая для графитизации температура на удалении $\approx 2 \cdot r$ не достигается даже к моменту непосредственного воздействия лазерного излучения. Напротив, для плотностей мощности $I_0 \geq 10^{11}$ Вт/м² температура в зоне действия лазерного излучения и в ее окрестности превышает температуру плавления алмаза при нормальном давлении, что, очевидно, приводит к неуправляемости процесса резки алмаза, и, как следствие, к возникновению дефектов вблизи линии реза. Оптимальным представляется использование лазерного излучения, формирующего тепловой источник со значением плотностей мощности в диапазоне $I_0 = 2 \cdot 10^{10} \div 8 \cdot 10^{10}$ Вт/м², при которых реализованы необходимые режимы реза, т.е. предварительная графитизация с последующим плавлением материала после 1÷4 «проходов» соответственно.

Для фиксированного значения плотности мощности $I_0 = 6 \cdot 10^{10}$ Вт/м² проведены исследования температурного поля при различных значениях скорости движения теплового источника (см. рисунок 3).

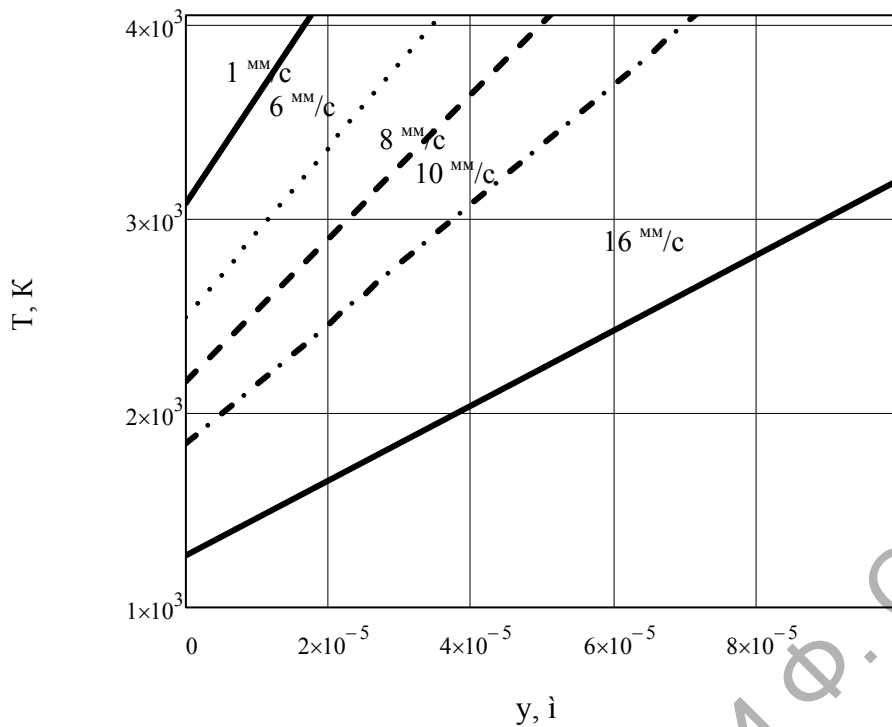


Рисунок 3 – Распределение температуры по координате y при различных скоростях сканирования

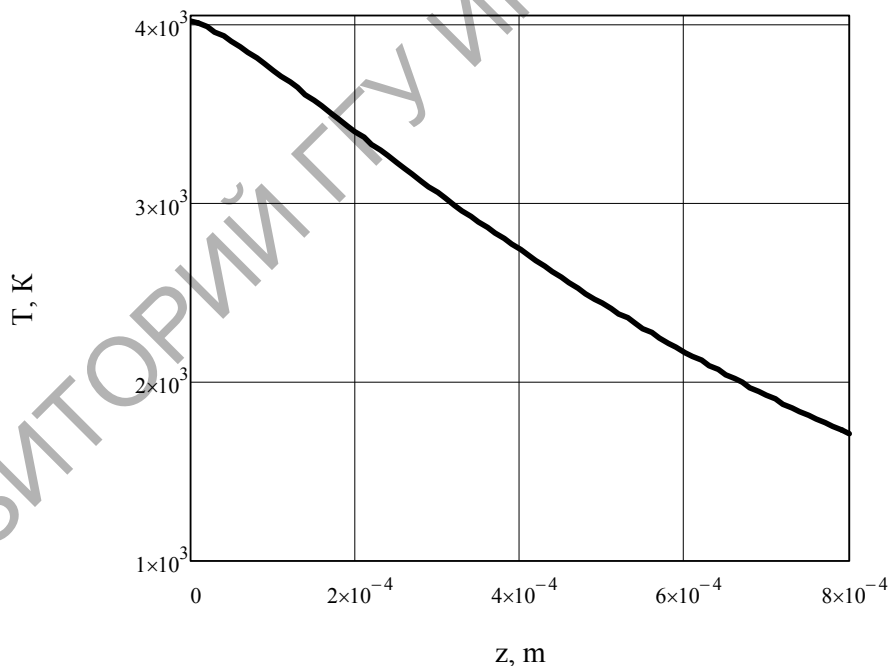


Рисунок 4 – Распределение температуры по глубине обрабатываемого алмаза

Как видно из графиков, на рисунке 3 при скоростях сканирования $v < 1 \text{ мм/с}$ обрабатываемый материал быстро достигает температуры плавления и процесс резки становится неуправляем. Для значений скорости $v \geq 16 \text{ мм/с}$ необходимые режимы резки не достигаются, однако они могут быть использованы для поверхностной графитизации образца, что также имеет прикладное значение. Оптимальным, с точки зрения технологии, является режим резки при скорости движения теплового источника $v \approx 8 \text{ мм/с}$, при указанных значениях плотности мощности и времени экспозиции.

Важным технологическим параметром лазерной резки материалов является шаг перефокусировки (толщина удаленного лазером материала за один проход). Указанный параметр можно оценить, проанализировав распределение температуры по глубине образца для одного «прохода» (см. рисунок 4). Из рисунка видно, что температура фазового перехода алмаз-графит достигается на глубине $\approx 5 \cdot 10^{-4}$ м. Это значение и можно считать расчетным значением шага перефокусировки.

Заключение

Таким образом, на основании результатов математического моделирования установлены оптимальные параметры лазерной резки алмазов, а именно: плотность мощности поверхностного источника $I_0 = 6 \cdot 10^{10}$ Вт/м², скорость движения теплового источника $v \approx 8$ мм/с, шаг перефокусировки $5 \cdot 10^{-4}$ м. Указанные значения с хорошей точностью согласуются с результатами экспериментальных исследований [1] и могут быть рекомендованы для использования в технологических процессах обработки алмазов.

Литература

1 Ретухин, Г.Е. Размерная обработка ювелирных алмазов излучением YAG:ND лазера с модулированной добротностью / Г.Е. Ретухин, А.Г. Кошечев, И.В. Файн, Е.Б. Шершнева // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэх. навук. – 2001. – № 1. – С. 73–77.

2 Углов, А.А. К расчету температурных полей от движущихся концентрированных источников энергии / А.А. Углов, И.Ю. Смуров, С.С. Андриянов // Физика и химия обработки материалов. – 1981. – № 1. – С. 35.

3 Абрамов, О.В. К расчету тепловых полей при сканировании источника энергии / О.В. Абрамов, А.П. Гуськов, С.Ф. Моряцев, С.С. Черепнев // Физика и химия обработки материалов. – 1987. – № 2. – С. 64–68.

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Поступило 08.11.11

²Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины