

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ВЕЩЕСТВЕ ПРИ ЛАЗЕРНОМ НАГРЕВЕ

Д. А. Максименко

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель П. С. Шаповалов

Современное промышленное производства требует широкого применения лазеров для резки материалов, лазерной сварки, термообработки и наплавки различных материалов [1]. Использование лазеров, в первую очередь, предполагается в тех тех-

нологических процессах, которые неосуществимы с помощью других источников энергии, и там, где применение лазера обеспечивает большую эффективность работы и большую производительность труда.

Для эффективного использования лазеров технологий нагрева и плавления необходимо знать распределение температур в веществе в зависимости от распределения интенсивности света в поперечном сечении пучка. Основной физической характеристикой процесса нагрева при воздействии лазерного излучения является температурное поле в материале. Если распределение температуры в веществе известно, то это позволяет выбрать наиболее эффективные и рациональные технологические режимы обработки материалов.

Для расчета температурного поля в материале, нагреваемого лазерным пучком, воспользуемся неоднородным эллиптическим уравнением теплопроводности [2]. Для нагрева вещества используем лазерный пучок с круговой симметрией, тогда исходное уравнение в полярной системе координат примет вид

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = -\frac{1}{\lambda} I, \quad (1)$$

где T – распределение температуры в веществе; λ – теплопроводность материала, I – лазерный тепловой источник, r – радиус полярной координаты.

Лазерный тепловой источник представим в виде произведения круговой гауссовой функции на многочлен четной степени от r :

$$I = (C_0 + C_1 r^2 + C_2 r^4 + \dots + C_n r^{2n}) \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right), \quad (2)$$

где w – радиус пучка. В случае $C_0 \neq 0$, а $C_i = 0$, ($i = \overline{1, n}$) имеем обычный гауссов круговой пучок, где C_0 является интенсивностью лазерного излучения на оси пучка $r = 0$. Если $C_0 = 0$, то имеем кольцевой лазерный пучок. Такое представление теплового источника позволяет подобрать произвольную форму пучка обладающей круговой симметрией.

Учитывая постановку задачи для решения уравнения (1), граничные условия могут быть записаны в виде

$$T(r = b) = 0; \quad (3a)$$

$$\frac{dT(r = 0)}{dr} = 0. \quad (3б)$$

Если в первом граничном условии (3a) положить, что b стремится к ∞ , то из этого вытекает, что на бесконечности температура равна нулю. Второе граничное условие (3б) следует из круговой симметрии лазерного теплового источника задачи.

Интегрируя дифференциальное уравнение (1), с учетом граничного условия (3б) получим:

$$\frac{dT}{dr} = \frac{w^2}{4\lambda} r e^{-\frac{2r^2}{w^2}} \sum_{k=1}^n C_k \left[r^{2k} + \sum_{i=1}^k k(k-1) \dots (k-i+1) \frac{w^{2i}}{2^i} r^{2(k-i)} \right]. \quad (4)$$

Интегрируя с учетом первого граничного условия (3), получим решение уравнения (4) в аналитическом виде:

$$T = -\frac{\lambda w^2}{8} \left[e^{-\frac{2r^2}{w^2}} \sum_{k=2}^n S_k(r) - e^{-\frac{2a^2}{w^2}} \sum_{k=2}^n S_k(b) + \left(Ei\left(\frac{2r^2}{w^2}\right) - Ei\left(\frac{2b^2}{w^2}\right) - 2\ln(r) + 2\ln(b) \right) \times \right. \\ \left. \times \sum_{k=1}^{n+1} (-1)^{k-1} \frac{C_{k-1} w^{2(n-1)}}{2^{k-1}} k(k-1) \dots 2 \cdot 1 \right], \quad (5)$$

где $S_k(r) = C_k \sum_{i=1}^k \left((-1)^{k-1} \frac{w^{2(r-i+1)} r^{2(i-1)}}{2^{r-i+1}} \sum_{m=i}^k \frac{1}{m} k(k-1) \dots (i+1)i \right)$; $Ei(x)$ – интегральная показательная функция [3]. В случае, когда используется обыкновенный круговой гауссов пучок ($C_0 \neq 0, C_i = 0, i = \overline{1, n}$), распределение температурного поля имеет вид

$$T = -\frac{\lambda w^2 C_0}{8} \left[Ei\left(\frac{2r^2}{w^2}\right) - Ei\left(\frac{2b^2}{w^2}\right) - 2\ln\left(\frac{r}{b}\right) \right]. \quad (6)$$

При численном исследовании решений (5), (6) использовались круговые и кольцевые гауссовы пучки (рис. 1).

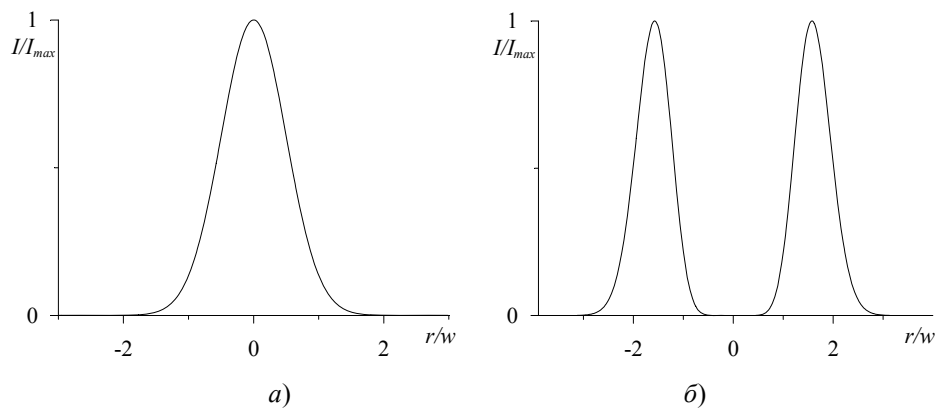


Рис. 1. Распределение интенсивности излучения в поперечном сечении кругового (а) $C_0 \neq 0$ и кольцевого гауссового пучка (б) $C_5 \neq 0$

Качественное распределение температурного поля при воздействии таких пучков на поверхность материала представлено на рис. 2.

Из рис. 2, а следует, что использование кругового пучка приводит к более узкому отверстию в материале и при одинаковой мощности с кольцевым пучком к более глубокому отверстию, что выгодно при резке материалов. Использование кольцевых пучков выгодно для равномерного нагрева и плавления (наплавки) материала.

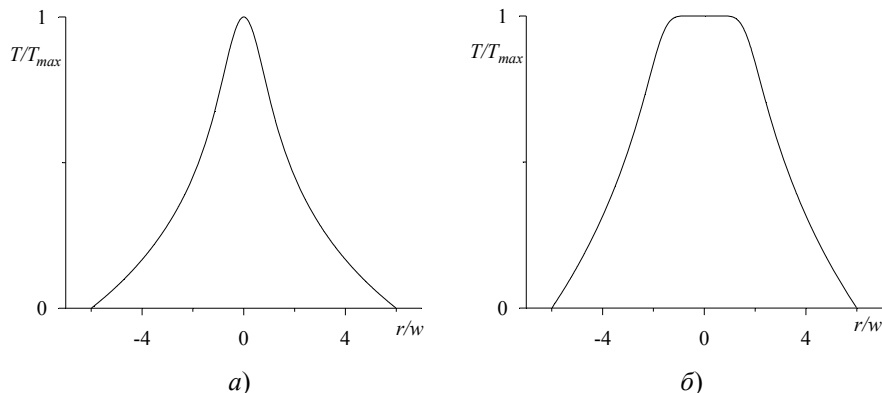


Рис. 2. Распределение температурного поля на поверхности материала при нагревании круговым (а) $C_0 \neq 0$, $b = 6r/w$ и кольцевым (б) $C_5 \neq 0$, $b = 6r/w$ гауссовым пучком

Дальнейшее изучение влияния формы лазерного пучка на температурное распределение в веществе позволит найти оптимальный режим работы лазерных инструментов в технологии лазерной резки и нагрева материалов.

Литература

1. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 663 с.
2. Моделирование тепловых процессов импульсного лазерного воздействия на металлы / А. А. Углов [и др.]. – М. : Наука, 1991. – 288 с.