

УДК 669.71.535.241

## ИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ НАПЛАВКА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ КОЛЬЦЕВЫМИ ПУЧКАМИ

**А. В. МАКСИМЕНКО, В. Н. МЫШКОВЕЦ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»,  
Республика Беларусь*

**П. С. ШАПОВАЛОВ**

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

### **Введение**

Во многих отраслях промышленности в последние годы все шире используются лазерная сварка, термообработка и наплавка различных материалов [1]. Использование лазеров в первую очередь предполагается в тех технологических процессах, которые неосуществимы с помощью других источников энергии.

Одно из таких направлений в технологии – обработка материалов лазерными пучками. Данный вид обработки позволяет воздействовать на изделия, имеющие поверхности кольцевой формы, при их сварке или термообработке. Использование лазерных пучков кольцевого сечения вместо круговых пучков повышает качество и эффективность процесса импульсной лазерной наплавки металлов вследствие увеличения коэффициента формы наплавки.

Основной физической характеристикой процесса нагрева при воздействии лазерного излучения является температурное поле в материале. Если распределение температуры в материале известно, то это позволяет выбрать рациональные технологические режимы обработки.

### **Теоретическая часть**

Для расчета температурного поля на поверхности материала, нагреваемого лазерным пучком, воспользуемся неоднородным эллиптическим уравнением теплопроводности [2]. Будем считать, что используемый лазерный пучок обладает круговой симметрией, тогда исходное уравнение в полярной системе координат имеет вид:

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

где  $T$  – температура;  $\lambda$  – теплопроводность материала;  $I$  – интенсивность теплового источника.

Тепловой источник представим в виде произведения круговой гауссовой функции на многочлен четной степени от  $r$ , что позволяет описывать распределение температуры, создаваемое пучками круговой симметрии, с произвольным радиальным распределением интенсивности:

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

Здесь  $w$  – радиус пучка. В случае  $C_0 \neq 0$ , а  $C_i = 0$ , ( $i = \overline{1, n}$ ) имеем обычный гауссовый круговой пучок, где  $C_0$  является интенсивностью лазерного излучения на оси пучка  $r = 0$ . Если  $C_0 = 0$ , то имеем кольцевой лазерный пучок. И в зависимости от выбора  $C_i$  можно подобрать произвольную форму пучка.

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

$$\begin{aligned} T(r=b) &= 0, \\ \frac{dT(r=0)}{dr} &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Если в первом граничном условии положить, что  $b$  стремится к  $\infty$ , то из этого вытекает, что на бесконечности температура равна нулю. Второе граничное условие следует из круговой температурного источника.

Интегрируя дифференциальное уравнение (1) с учетом второго граничного условия (3), 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 уравнение (4) с учетом первого граничного условия (3), получим выражение описывающее распределение температурного поля на поверхности материала нагреваемого лазерным пучком с круговой симметрией:

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

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], [4]. 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 моделировании процесса нагревания лазерным пучком поверхности использовались обыкновенные круговые гауссовы пучки и различные кольцевые пучки (рис. 1).

Качественное распределение температурного поля при воздействии таких пучков на поверхность материала имеет вид, представленный на рис. 2.

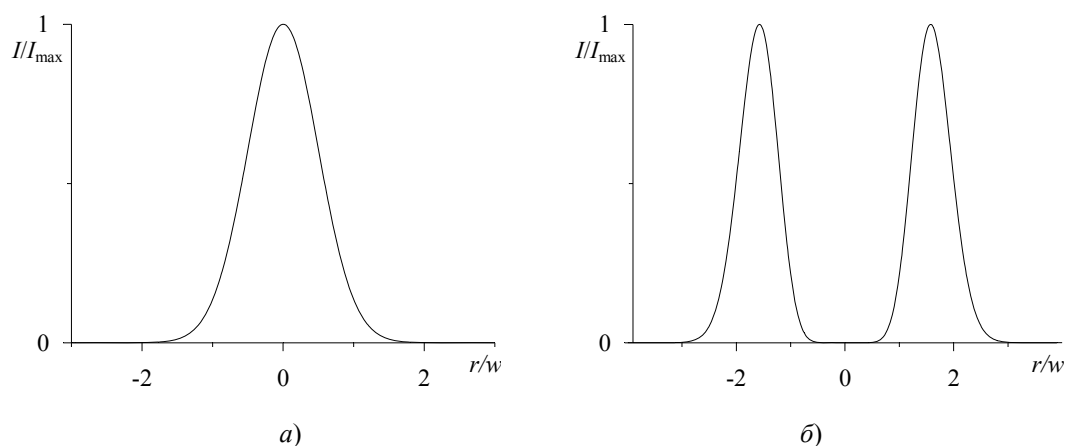


Рис. 1. Распределение интенсивности излучения в поперечном сечении кругового (а,  $(C_0 \neq 0, C_i = 0)$ ) и кольцевого гауссового пучка (б,  $(C_5 \neq 0, C_i = 0)$ )

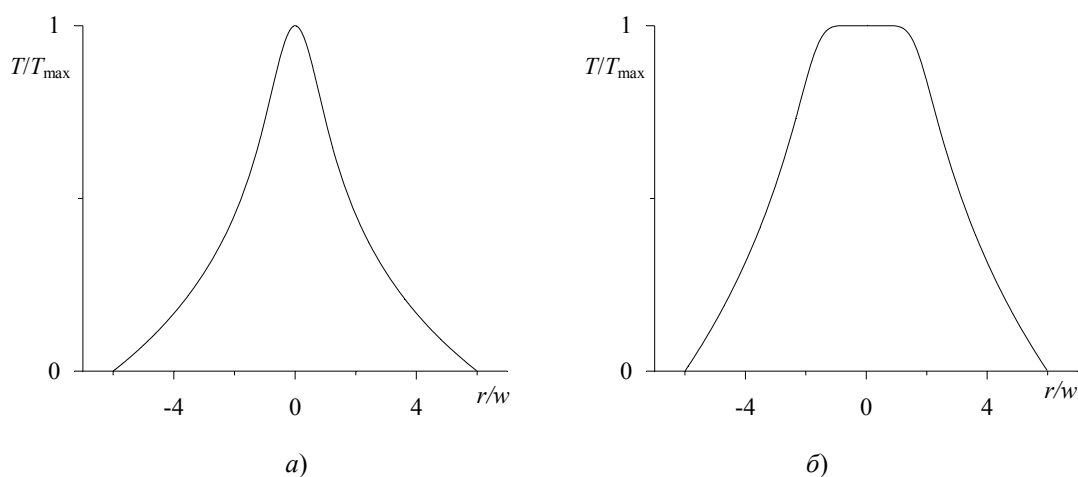


Рис. 2. Распределение температурного поля на поверхности материала при нагревании круговым (а,  $(C_0 \neq 0, b = 6r/w)$ ) и кольцевым гауссовым пучком (б,  $(C_5 \neq 0, b = 6r/w)$ )

### Экспериментальная часть

Для формирования кольцевых пучков в настоящей работе была использована оптическая схема [5], в состав которой входят телескопическая система и две конические линзы (рис. 3). Одна коническая линза помещена между линзами телескопа, а вторая расположена на расстоянии от телескопической системы.

Лазер 1 генерирует цилиндрической формы пучок со сплошным круговым сечением, который, пройдя через отрицательную линзу 2, первую коническую линзу 3 и положительную линзу 4, перераспределяется в кольцевой пучок за счет преломления на конической поверхности линзы 3. Затем этот пучок направляется на вторую коническую линзу 5, у которой угол при основании выбран таким образом, чтобы после преломления он распространялся параллельно оптической оси системы. Угол падения  $\alpha_5$  на вторую коническую линзу 5 для параллельного лазерного пучка определяется выражением

$$\alpha_5 = \Theta_3(n - 1)(1 - d_2\Phi_4), \tag{7}$$

где  $\Theta_3$  – угол при основании конической линзы 3;  $d_2$  – расстояние между конической линзой 3 и положительной линзой 4 телескопической системы;  $\Phi_4$  – оптическая сила

линзы 4;  $n$  – показатель преломления материала, из которого изготовлены конические линзы.

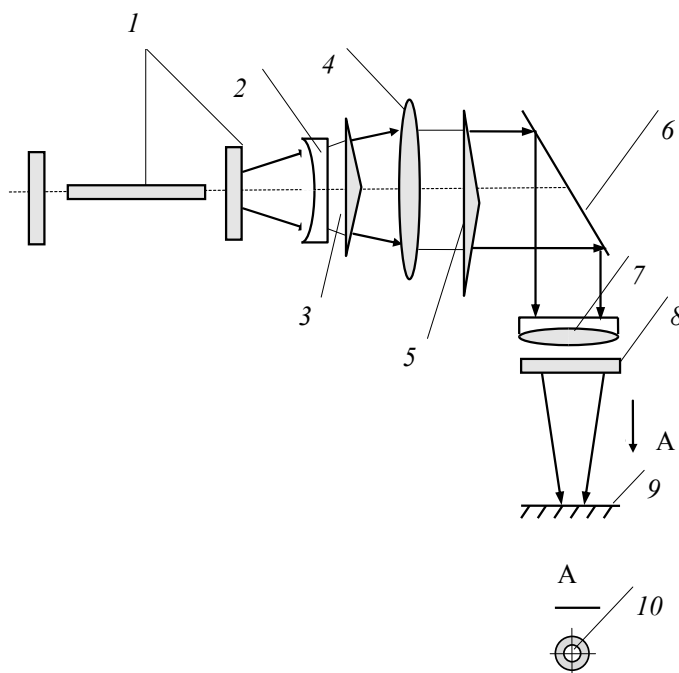


Рис. 3. Оптическая схема для формирования кольцевых пучков

Плавное изменение диаметров кольцевых контуров осуществляется за счет перемещения конической линзы 3 вдоль оси оптической системы относительно одного из компонентов телескопической системы (рис. 4.1). Диаметр кольца в плоскости обработки определяется выражением

$$D \approx 2f_{об} \Theta_3 (n-1)(1-d_2 \Phi_3), \quad (8)$$

где  $f_{об}$  – фокусное расстояние объектива 7, а величина  $d_2$  изменяется в следующих пределах:

$$d_{2min} \leq d_2 \leq d_{2max}. \quad (9)$$

Величины  $d_{2min}$  и  $d_{2max}$  зависят от конструктивного исполнения телескопической системы.

Данная оптическая схема разработана для установки, в состав которой входят: лазерный излучатель с оптико-механической приставкой для формирования пучков заданной геометрии и системой визуального наблюдения. Лазерная установка содержит блоки питания и управления работой лазерного излучателя, а также систему охлаждения и трехпозиционную координатную систему с микрошаговыми двигателями, управляемыми от персонального компьютера.

Лазерный излучатель изготовлен на базе двухлампового квантрона с активным элементом на АИГ:  $\text{Nd}^{+3}$  размером  $8 \times 100$  мм и диффузным отражателем. Источник питания для ламп накачки излучателя (ИНП-7×90) обеспечивает в режиме свободной генерации выходную энергию порядка 15 Дж с регулируемой длительностью импульсов от 2 до 10 мс.

Оптическая схема установки с входящими в ее состав элементами представлена на рис. 4.

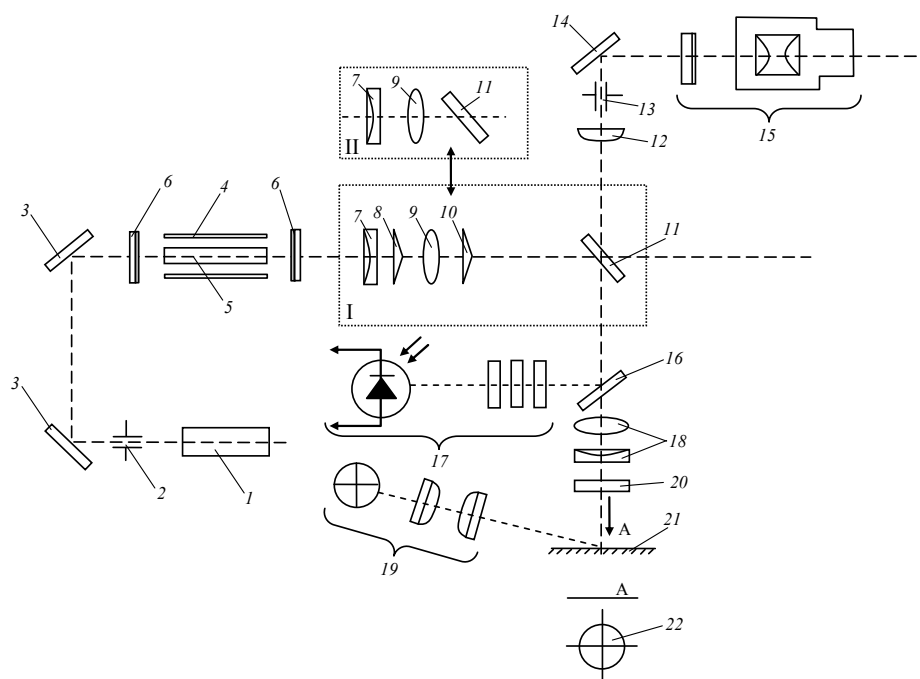


Рис. 4. Оптическая схема установки для обработки материалов круговыми и кольцевыми пучками: 1 – гелий-неоновый лазер; 2 – диафрагма; 3 – поворотные зеркала; 4 – лампы накачки; 5 – активный элемент на АИГ:Nd<sup>3+</sup>; 6 – зеркала резонатора лазера; 7, 9 – телескопическая система; 8, 10 – аксиконы; 11 – поворотное интерференционное зеркало; 12 – корректирующая линза; 13 – электромеханический шаттер; 14 – поворотное зеркало; 15 – светофильтр и бинокуляр; 16 – светоделительная пластинка; 17 – устройство контроля временных и энергетических характеристик лазерного излучения; 18 – фокусирующий объектив; 19 – система подсветки; 20 – защитное стекло; 21 – плоскость обработки; 22 – вид контура лазерного пучка

Кроме этого уникальность использования данной установки при проведении экспериментальных работ состоит в том, что она снабжена оптико-механическими приставками, формирующими лазерные пучки заданной геометрии. Применение приставки I или II позволяет получать пучки в виде круглого сечения или кольца.

Регулируемый диаметр пятна круглого сечения в фокальной плоскости обработки – от 0,2 до 1,5 мм, а диапазон перестройки диаметров кольцевых контуров – от 0 до 10,4 мм. Нулевое значение – кольцевой контур превращается в пятно круглого сечения.

В работе исследования процесса наплавки проводились на поверхность образцов из стали 30ХГСА при использовании пучков кольцевого и кругового сечения в среде аргона. В ходе исследований плотность мощности выбиралась таким образом, чтобы глубина плавления основы соответствовала диапазону оптимальных значений, которые были определены ранее в предположении об использовании присадочного материала в виде проволоки диаметром  $0,5 \cdot 10^{-3}$  м. Экспериментально определенные распределения интенсивности по поперечному сечению лазерных пучков и микрошлифы наплавки представлены на рис. 5.

### Заключение

Анализ результатов решения уравнения (1) и экспериментальных исследований показал, что внешний вид изотермических поверхностей, характеризующих структурные и фазовые превращения в глубине материала, представленные на шлифах (рис. 5), соответствует распределению температурных полей на поверхности материала.

Форма поверхности наплавки, реализованной с использованием пучка кольцевого сечения, имеет более выпуклую сфероидальную поверхность, чем при воздейст-

вии пучка кругового сечения. Это обстоятельство подтверждает то, что при наплавке кольцевым пучком расплав движется от периферии к центру и кристаллизуется в более выпуклой сферической форме.

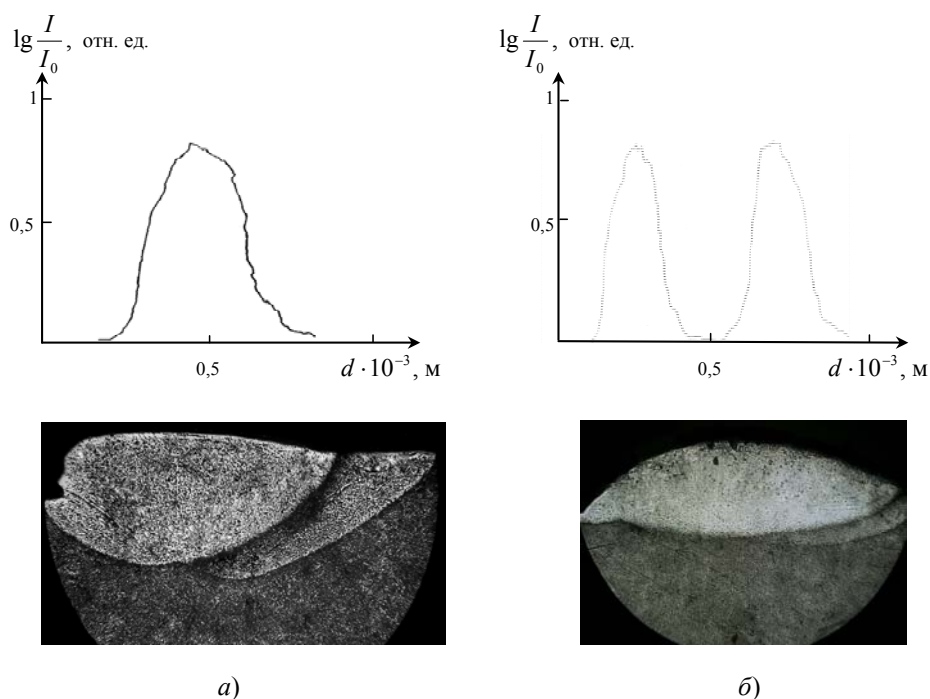


Рис. 5. Распределение интенсивности по поперечному сечению лазерных пучков кругового (а) и кольцевого (б) контуров и соответствующие микрошлифы наплавки

На основании проведенных исследований был сделан вывод о том, что для увеличения коэффициента формы валика наплавки необходимо использовать лазерные пучки кольцевого сечения.

### Литература

1. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 663 с.
2. Моделирование теплофизических процессов импульсного лазерного воздействия на металлы / А. А. Углов [и др.]. – Москва : Наука, 1991. – 288 с.
3. Установка для лазерной обработки кольцевым пучком : а. с. 1557845 СССР, МКИ В23К 26/00 / А. Т. Малащенко, В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, Г. Л. Покаташкин ; Гомел. гос. ун-т. – № 4379625 ; заявл. 17.02.88 ; опубл. 15.12.89.
4. Установка для лазерной обработки кольцевым пучком : пат. № 2068328 РФ, МПК 6 В23К 26/00 / А. Т. Малащенко, В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, Г. Л. Покаташкин ; заявитель Гомел. гос. ун-т им. Ф. Скорины. – № 4884890 ; заявл. 26.11.90 ; опубл. 27.11.96 // Официальный бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 1996. – № 30.
5. Мышковец, В. Н. Система формирования лазерного излучения в пучки кольцевого сечения / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, И. М. Каморников // Лазерная физика и спектроскопия : материалы IV Междунар. конф. по лазерной физике и спектроскопии : в 2 ч. / под ред. В. К. Кононенко. – Гродно, 1999. – Ч. 2. – С. 174–176.

Получено 10.09.2010 г.