



ВЛИЯНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОГЛОЩЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА ПРИ СВАРКЕ С ГЛУБОКИМ ПРОПЛАВЛЕНИЕМ

И. В. КРИВЦУН, д-р техн. наук, **А. Н. ТАЛЕРКО**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработана математическая модель для расчета пространственного распределения мощности лазерного излучения, поглощаемого поверхностью пароголового канала при лазерной сварке с глубоким проплавлением. Модель позволяет учитывать влияние условий фокусировки исходного пучка, длины волны и поляризации лазерного излучения на его поглощение в пароголовом канале произвольной формы при учете многократных отражений падающего излучения поверхностью канала. С помощью разработанной модели показано существенное влияние поляризации лазерного излучения, формы и размеров канала на распределенные и интегральные характеристики поглощения лазерного пучка свариваемым металлом.

Ключевые слова: лазерная сварка, пароголовый канал, лазерный пучок, поляризация излучения, коэффициент поглощения, металл, поверхность

Воздействие на металлы такого высококонцентрированного источника тепла, как сфокусированный лазерный пучок, приводит к интенсивному нагреву, плавлению и испарению металла, вызывающему образование в его расплаве пароголового канала [1]. Коэффициент поглощения электромагнитных волн плоской поверхностью расплавленного металла достаточно мал и при нормальном падении излучения с длинами волн в диапазоне, характерном для большинства технологических лазеров, по данным [2], составляет 5...40%. Образование пароголового канала приводит к значительному увеличению эффективности поглощения лазерного излучения за счет его многократных отражений стенками канала. Кроме того, при движении лазерного пучка относительно образца (как, например, при сварке) исходный пучок падает на переднюю стенку канала, имея достаточно большой угол падения, поэтому его поглощение может существенно зависеть от направления вектора поляризации падающего излучения [3].

Существуют различные модели для количественного описания особенностей распространения и поглощения лазерного излучения в пароголовом канале, однако большинство из них ограничивается рассмотрением каналов осесимметричной формы [1, 4]. Вместе с тем при высоких скоростях лазерной сварки, а также при гибридных лазерно-дуговых процессах форма пароголового канала может быть существенно несимметричной. Поэтому целью настоящей работы является разработка математической модели для расчета интегральных и распределенных характеристик поглощения лазерного пучка поверхностью пароголового канала произвольной формы при учете многократных отражений излучения стенками канала (поглощением лазерного излучения в потоке пара, заполняющего канал, будем пренебрегать).

Пусть в металлическом образце под воздействием сфокусированного пучка лазерного излучения формируется пароголовый канал, форма свободной поверхности которого задается уравнением $z = z_s(x, y)$ (рис. 1). Система координат выбрана таким образом, что ось Oz направлена вниз и совпадает с осью пучка, а плоскость $z = 0$ совпадает с верхней (плоской) поверхностью образца. Представим исходный лазерный пучок в виде квазиплоской электромагнитной волны, распространяющейся в направлении оси Oz , и положим, что он имеет гауссово распределение интенсивности излучения, предполагаемого линейно поляризованным, например, так, что вектор электрического поля падающей волны составляет угол φ_0 ($0 \leq \varphi_0 \leq \pi/2$) с положительным направлением оси Ox . Пространственное распределение комплексной амплитуды электрического поля такого пучка можно записать в виде [5]

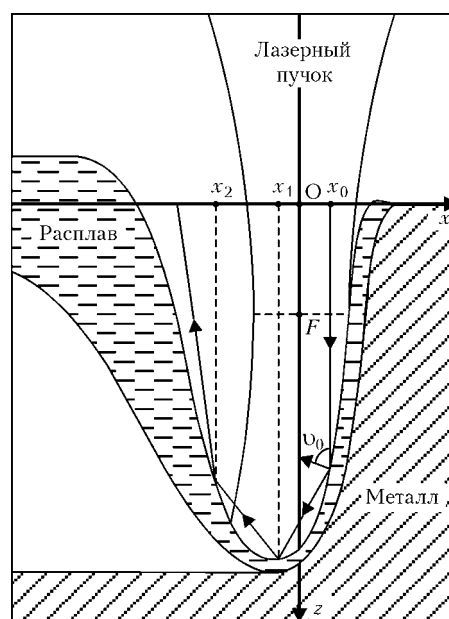


Рис. 1. Схема взаимодействия лазерного пучка с поверхностью пароголового канала при лазерной сварке

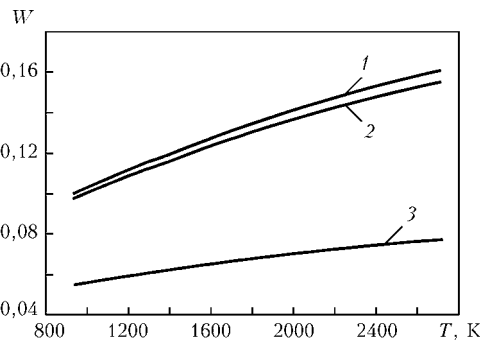


Рис. 2. Зависимость коэффициента поглощения лазерного излучения при нормальном падении на плоскую поверхность расплавленного алюминия от температуры этой поверхности (оптические свойства жидкого алюминия взяты из [2]): 1 — диодный лазер, $\lambda = 0,808$ мкм; 2 — АИГ-лазер, $\lambda = 1,06$ мкм; 3 — CO_2 -лазер, $\lambda = 10,6$ мкм

$$\mathbf{E}_0(x, y, z) = \mathbf{E}_F \frac{w_F}{w_z} \exp \left[-\frac{x^2 + y^2}{w_z^2} + i \left(k \frac{x^2 + y^2}{2R_z} - \varphi_z \right) \right],$$

$$\mathbf{E}_F = E_F(\cos \varphi_0, \sin \varphi_0, 0). \quad (1)$$

Здесь

$$w_z^2(z) = w_F^2 \left[1 + \frac{(z - F)^2}{z_F^2} \right]; \quad R_z(z) = (z - F) \left[1 + \frac{z_F^2}{(z - F)^2} \right];$$

$$\varphi_z(z) = \arctg \left(\frac{z - F}{z_F} \right), \quad z_F = \frac{k w_F^2}{2}, \quad (2)$$

где w_F — минимальная полуширина лазерного пучка; F — расстояние плоскости фокусировки пучка от поверхности образца (см. рис. 1); $k = 2\pi/\lambda$ — волновой вектор; λ — длина волны лазерного излучения.

Распределение интенсивности излучения в рассматриваемом пучке можно найти с помощью соотношения [3]

$$I_0(x, y, z) = \frac{c}{8\pi} |\mathbf{E}_0|^2, \quad (3)$$

где c — скорость света.

Значение E_F из (1) определяется из интегрального выражения для полной мощности пучка Q_0 , что дает

$$E_F^2 = 16Q_0 / (c w_F^2). \quad (4)$$

Поглощение лазерного излучения металлами, происходящее в тонком приповерхностном слое, зависит от температуры поверхности металла и длины волны излучения (рис. 2), а при наклонном падении — и от его поляризации (рис. 3). В общем случае коэффициенты поглощения электромагнитных волн изотропным металлом для двух независимых поляризаций падающей волны могут быть определены с помощью соотношений [6]:

$$W^{(p, s)} = -\frac{4\text{Re}(Z_\omega^{(p, s)})}{|1 - Z_\omega^{(p, s)}|^2}. \quad (5)$$

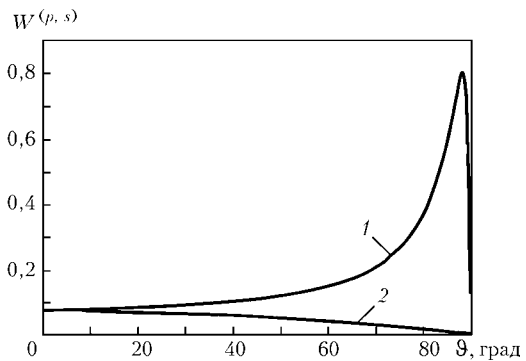


Рис. 3. Зависимость коэффициента поглощения линейно поляризованного излучения CO_2 -лазера ($\lambda = 10,6$ мкм) поверхностью жидкого алюминия при температуре кипения алюминия ($T = 2720$ К) от угла падения: 1 — p -поляризация; 2 — s -поляризация

Пренебрегая пространственной дисперсией диэлектрической проницаемости металла, для величин $Z_\omega^{(p, s)}$ получаем следующие выражения [6]:

$$Z_\omega^{(p)} = -\frac{\sqrt{\epsilon_\omega - \sin^2 \vartheta}}{\epsilon_\omega \cos \vartheta}; \quad Z_\omega^{(s)} = -\frac{\cos \vartheta}{\sqrt{\epsilon_\omega - \sin^2 \vartheta}}, \quad (6)$$

где $\epsilon_\omega(T)$ — комплексная диэлектрическая проницаемость на частоте лазерного излучения $\omega = 2\pi c/\lambda$ для металла при температуре T ; ϑ — угол падения. Индекс p соответствует случаю падения волны, вектор электрического поля которой параллелен плоскости падения (p -поляризация); s — случаю, когда перпендикулярен плоскости падения (s -поляризация).

Для расчета распределенных и интегральных характеристик поглощения лазерного пучка в парогазовом канале с учетом многократных отражений излучения от его стенок будем использовать приближение геометрической оптики. Пренебрегая кривизной поверхности волнового фронта падающего пучка вблизи плоскости фокусировки (при $|z - F|^2 \ll z_F^2$), представим исходный лазерный пучок в виде совокупности прямолинейных лучей, параллельных оси Oz , каждый из которых характеризуется координатами (x_0, y_0) точки первого падения на поверхность металла. Тогда ход отраженных лучей внутри парогазового канала (см. рис. 1) можно определить с помощью уравнений

$$\frac{x - x_m}{a_{m+1}} = \frac{y - y_m}{b_{m+1}} = \frac{z - z_m}{c_{m+1}}, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (7)$$

где $\{x_m(x_0, y_0), y_m(x_0, y_0), z_m(x_0, y_0)\}$ — пространственные координаты точки $m + 1$ падения соответствующего луча на поверхность канала; $a_{m+1}(x_0, y_0), b_{m+1}(x_0, y_0), c_{m+1}(x_0, y_0)$ — направляющие косинусы единичного вектора ($a_{m+1}^2 + b_{m+1}^2 + c_{m+1}^2 = 1$) в направлении отраженного луча после $m + 1$ отражения.

Координаты точек отражения находятся из условий пересечения отраженных лучей с поверхностью парогазового канала (при условии, что данный луч после предыдущего отражения не выходит за пределы канала):



$$\frac{x_{m+1} - x_m}{a_{m+1}} = \frac{y_{m+1} - y_m}{b_{m+1}} = \frac{z_s(x_{m+1}, y_{m+1}) - z_m}{c_{m+1}}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

Направляющие косинусы определяются исходя из условий, что угол падения $\vartheta_m(x_0, y_0)$ равен углу отражения и что падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости с вектором нормали к поверхности $z = z_s(x, y)$ в точке падения:

$$\begin{aligned} \cos \vartheta_m &= a_{m+1}\alpha_m + b_{m+1}\beta_m + c_{m+1}\gamma_m = \\ &= -(a_m\alpha_m + b_m\beta_m + c_m\gamma_m); \\ a_{m+1}(b_m\gamma_m - c_m\beta_m) + b_{m+1}(c_m\alpha_m - a_m\gamma_m) + \\ &+ c_{m+1}(a_m\beta_m - b_m\alpha_m) = 0, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\alpha_m(x_0, y_0)$, $\beta_m(x_0, y_0)$, $\gamma_m(x_0, y_0)$ — направляющие косинусы единичного вектора внутренней нормали к поверхности пароголового канала в точке $m + 1$ падения соответствующего луча:

$$\begin{aligned} \alpha_m &= \frac{p_m}{\sqrt{1 + p_m^2 + q_m^2}}; \quad \beta_m = \frac{q_m}{\sqrt{1 + p_m^2 + q_m^2}}; \\ \gamma_m &= -\frac{1}{\sqrt{1 + p_m^2 + q_m^2}}; \\ p_m &= \frac{\partial z_s}{\partial x} \Big|_{x=x_m, y=y_m}; \quad q_m = \frac{\partial z_s}{\partial y} \Big|_{x=x_m, y=y_m}. \end{aligned} \quad (10)$$

Направляющие косинусы для лучей исходного лазерного пучка равны

$$a_0 = b_0 = 0, \quad c_0 = 1. \quad (11)$$

Уравнение для плоскости падения луча на поверхность пароголового канала может быть записано в виде

$$A_m x + B_m y + C_m z + D_m = 0, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (12)$$

где $A_m(x_0, y_0)$, $B_m(x_0, y_0)$, $C_m(x_0, y_0)$ — направляющие косинусы единичного вектора нормали к плоскости $m + 1$ падения исходного луча с координатами (x_0, y_0) .

Соответствующие направляющие косинусы могут быть определены из условий, что данная плоскость проходит через точку падения, падающий луч и вектор нормали к поверхности канала в этой точке параллельны плоскости падения:

$$\begin{aligned} A_m x_m + B_m y_m + C_m z_m + D_m &= 0; \\ A_m a_m + B_m b_m + C_m c_m &= 0; \\ A_m \alpha_m + B_m \beta_m + C_m \gamma_m &= 0, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (13)$$

а также условия, что $A_m^2 + B_m^2 + C_m^2 = 1$. Для плоскостей падения лучей исходного лазерного пучка

$$A_0 = \frac{\beta_0}{\sqrt{\alpha_0^2 + \beta_0^2}}; \quad B_0 = -\frac{\alpha_0}{\sqrt{\alpha_0^2 + \beta_0^2}}; \quad C_0 = 0. \quad (14)$$

При первом падении луча исходного пучка на поверхность пароголового канала в точке $\{x_0, y_0, z_s(x_0, y_0)\}$ мощность излучения, падающего на эле-

ментарную площадку этой поверхности $dS_0(x_0, y_0) = -dS_0^{(x, y)}/\gamma_0(x_0, y_0)$, имеет вид

$$dP_0 = I_0 [x_0, y_0, z_s(x_0, y_0)] dS_0^{(x, y)}, \quad (15)$$

где $dS_0^{(x, y)} \equiv dx_0 dy_0$ — проекция dS_0 на плоскость xOy .

С учетом выражений (1) и (3) соответствующую долю данной мощности для каждой из двух независимых поляризаций излучения можно определить следующим образом:

$$dP_0^{(p)} = dP_0 \cos^2 \Psi_0; \quad dP_0^{(s)} = dP_0 \sin^2 \Psi_0, \quad (16)$$

где $\Psi_0(x_0, y_0)$ — угол между плоскостью первого падения выбранного луча и направлением вектора электрического поля исходного лазерного пучка.

Суммарную мощность излучения, поглощаемую площадкой dS_0 , можно записать как

$$d\bar{P}_0 = dP_0 (W_0^{(p)} \cos^2 \Psi_0 + W_0^{(s)} \sin^2 \Psi_0). \quad (17)$$

Тепловой поток, вводимый в металл исходным лазерным пучком в точке $\{x_0, y_0, z_s(x_0, y_0)\}$, можно вычислить как

$$q_0 = dP_0 (W_0^{(p)} \cos^2 \Psi_0 + W_0^{(s)} \sin^2 \Psi_0) / (dS_0), \quad (18)$$

где $W_0^{(p, s)}[\vartheta_0(x_0, y_0), T(x_0, y_0)]$ — значения коэффициентов поглощения соответственно для p - и s -поляризации в указанной точке поверхности.

Отраженная элементарной площадкой dS_0 мощность излучения, падающего затем на площадку dS_1 , есть

$$\begin{aligned} dP_1 &\equiv d\bar{P}_0 = \\ &= dP_0 [(1 - W_0^{(p)}) \cos^2 \Psi_0 + (1 - W_0^{(s)}) \sin^2 \Psi_0]. \end{aligned} \quad (19)$$

Повторив приведенные рассуждения для последующих отражений, можно получить рекуррентную формулу для нахождения $dP_{m+1}[x_{m+1}(x_0, y_0), y_{m+1}(x_0, y_0)]$:

$$\begin{aligned} dP_{m+1} &= dP_m [(1 - W_m^{(p)}) \cos^2 \Psi_m + \\ &+ (1 - W_m^{(s)}) \sin^2 \Psi_m], \quad m = 0, 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (20)$$

где $W_m^{(p, s)}[\vartheta_m(x_0, y_0), T(x_m, y_m)]$ и $\Psi_m(x_0, y_0)$ — значения коэффициентов поглощения и угла между плоскостью $m + 1$ падения луча на поверхность пароголового канала и направлением вектора электрического поля падающего излучения.

Значение $dP_0(x_0, y_0)$ вычисляем по формуле (15), угол можно определить с помощью соотношения

$$\begin{aligned} \sin^2 \Psi_m &= \frac{[A_m (E_m^{(p)} + E_m^{(s)})_x + B_m (E_m^{(p)} + E_m^{(s)})_y + C_m (E_m^{(p)} + E_m^{(s)})_z]^2}{(E_m^{(p)} + E_m^{(s)})_x^2 + (E_m^{(p)} + E_m^{(s)})_y^2 + (E_m^{(p)} + E_m^{(s)})_z^2}, \\ m &= 0, 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (21)$$

где компоненты электрического поля $\mathbf{E}_m = \mathbf{E}_m^{(p)} + \mathbf{E}_m^{(s)}$ при $m + 1$ падении луча на по-



верхность канала определяются из условий, что вектор $\mathbf{E}_m^{(p)}$ лежит в плоскости падения и перпендикулярен падающему лучу, а $\mathbf{E}_m^{(s)}$ перпендикулярен указанной плоскости:

$$\begin{aligned} (E_m^{(p)})_x a_m + (E_m^{(p)})_y b_m + (E_m^{(p)})_z c_m &= 0; \\ (E_m^{(p)})_x A_m + (E_m^{(p)})_y B_m + (E_m^{(p)})_z C_m &= 0; \\ \frac{A_m}{(E_m^{(s)})_x} = \frac{B_m}{(E_m^{(s)})_y} = \frac{C_m}{(E_m^{(s)})_z}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (22)$$

и условий, связывающих составляющие электрического поля для падающего и отраженного излучения при соответствующем падении:

$$\begin{aligned} (E_{m+1}^{(p)})^2 &= (1 - W_m^{(p)})(E_m^{(p)})^2; \\ (E_{m+1}^{(s)})^2 &= (1 - W_m^{(s)})(E_m^{(s)})^2, \quad m = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (23)$$

В частности, для первого падения, используя (1), (21), находим

$$\sin^2 \psi_0 = (A_0 \cos \varphi_0 + B_0 \sin \varphi_0)^2. \quad (24)$$

По аналогии с (18) тепловой поток $q_m[x_m(x_0, y_0), y_m(x_0, y_0), z_m(x_0, y_0)]$, вводимый в металл при $m + 1$ падении на поверхность канала луча (x_0, y_0) исходного пучка, можно записать в виде

$$\begin{aligned} q_m &= dP_m (W_m^{(p)} \cos^2 \psi_m + W_m^{(s)} \sin^2 \psi_m) / (dS_m), \\ m &= 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (25)$$

Здесь $dS_m(x_0, y_0) = -dS_m^{(x, y)} / \gamma_m(x_0, y_0)$, где $dS_m^{(x, y)}$ — площадь четырехугольника в плоскости xOy , вершины которого определяются координатами (x_m, y_m) точек пересечения лучей исходного пучка (x_0, y_0) ; $(x_0 + dx_0, y_0)$; $(x_0, y_0 + dy_0)$ и $(x_0 + dx_0, y_0 + dy_0)$ с поверхностью $z = z_s(x, y)$ при $m + 1$ отражении.

Результирующее пространственное распределение теплового потока, вводимого в металл лазер-

ным пучком, при учете многократных отражений излучения стенками парогазового канала может быть представлено в виде

$$\begin{aligned} q[x, y, z_s(x, y)] &= \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} \int \delta[x - x_m(x_0, y_0)] \delta[y - y_m(x_0, y_0)] q_m dx_0 dy_0. \end{aligned} \quad (26)$$

Интегрирование ведется по области изменения координат лучей исходного лазерного пучка, падающих на поверхность канала. Проинтегрировав затем выражение (26) по всей поверхности $z = z_s(x, y)$, можно вычислить полную мощность \bar{Q} , поглощаемую металлом, а также интегральный коэффициент поглощения, определяемый как

$$\bar{W} = \bar{Q} / Q_0. \quad (27)$$

Для численной реализации предложенной модели разработан алгоритм, в основу которого положен принцип дискретизации расчетной области путем построения двухмерной сетки в плоскости xOy и соответствующего массива, содержащего значения z -координат точек поверхности канала. Для каждой ячейки такой сетки определяли суммарное (по всем возможным отражениям) значение поглощаемой мощности излучения, при этом количество рассматриваемых отражений ограничивалось условием, что учет следующего отражения не приводит к изменению поглощенной мощности более чем на 1 %, а затем вычисляли соответствующее данной ячейке значение теплового потока.

Создано программное обеспечение, позволяющее проводить компьютерное моделирование распределенных и интегральных характеристик поглощения лазерного пучка при сварке с глубоким проплавлением. Входными параметрами для расчетной программы являются физические и геометрические характеристики исходного лазерного пучка (мощность, длина волны и направление вектора поляризации излучения, диаметр пучка в плоскости фокусировки и положение этой плоскости относительно поверхности образца), а также оптические свойства металла, форма и геометрические размеры канала. Следует отметить, что данная программа может быть использована для расчета характеристик поглощения лазерных пучков с произвольным (негауссовым) распределением интенсивности излучения. С помощью разработанного программного обеспечения проведен численный анализ особенностей поглощения гауссова пучка излучения CO_2 -лазера ($\lambda = 10,6$ мкм) в каналах различной формы применительно к условиям лазерной сварки алюминия. При этом глубина парогазового канала H варьировалась в диапазоне 2...10 мм, а температура его поверхности была принята однородной, равной температуре кипения алюминия. Параметрами исходного лазерного пучка выбраны следующие: мощность $Q_0 = 10$ кВт; расстояние плоскости фокусировки от поверхности образца $F = 5$ мм; диаметр пучка в этой плоскости d_F , определяемый как диаметр окружности, в пределах которой сос-

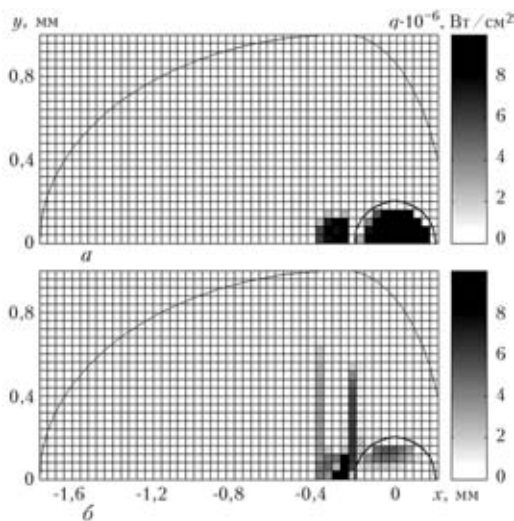


Рис. 4. Пространственное распределение теплового потока, вводимого в металл через поверхность парогазового канала ($H = 10$ мм) лазерным пучком с $d_F = 0,4$ мм и линейной поляризацией излучения и различным направлением сварки: $a - \varphi_0 = 0$; $b - \varphi_0 = \pi/2$

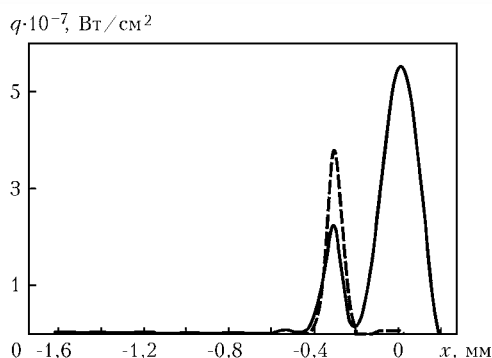


Рис. 5. Распределение теплового потока в плоскости симметрии канала ($y = 0$) при $\varphi_0 = 0$ (сплошная кривая) и $\pi/2$ (штриховая) (остальные параметры те же, что и на рис. 4)

редоточено 99 % мощности лазерного излучения ($2w_F = 0,66d_F$), варьировался в диапазоне 0,2...0,5 мм; угол между направлением вектора поляризации излучения и направлением сварки $\varphi_0 = 0 \dots \pi/2$. Используемые значения коэффициентов поглощения для p - и s -поляризованного излучения при различных углах падения выбирали в соответствии с данными, приведенными на рис. 3.

На рис. 4–7 представлены результаты расчетов распределенных и интегральных характеристик поглощения лазерного пучка в парогазовом канале, форма которого в выбранной системе координат задается уравнениями

$$1 - \frac{z}{H} = \begin{cases} \frac{(x + \Delta x)^2}{(R_x^+)^2} + \frac{y^2}{R_y^2}, & x + \Delta x > 0; \\ \frac{(x + \Delta x)^2}{(R_x^-)^2} + \frac{y^2}{R_y^2}, & x + \Delta x < 0, \end{cases} \quad (28)$$

при $R_x^+ = 0,5$ мм; $R_x^- = 1,5$ мм; $R_y = 1,0$ мм; $\Delta x = 0,25$ мм.

Влияние поляризации лазерного излучения на пространственное распределение теплового потока, вводимого в металл через поверхность такого канала, иллюстрируют рис. 4, 5. Видно, что при $\varphi_0 = 0$ наблюдается сильное поглощение излучения исходного лазерного пучка, падающего на переднюю стенку канала с большими значениями угла ϑ_0 (для осевого луча, например, $\vartheta_0 \approx 87^\circ$), тогда как излучение, поляризованное так, что $\varphi_0 = \pi/2$, весьма слабо поглощается при первом падении на поверхность канала (рис. 5). Это связано с существенным различием коэффициентов поглощения для p - и s -поляризованных волн при больших значениях угла падения (см. рис. 3). Отраженное после первого падения на поверхность металла лазерное излучение попадает на заднюю стенку канала, при этом при $\varphi_0 = 0$ формируется несколько быстроуменьшающихся по амплитуде дополнительных максимумов поглощения (сплошная кривая на рис. 5), соответствующих последующим отражениям и сосредоточенных вблизи плоскости xOz (см. рис. 4, а), а при $\varphi_0 = \pi/2$ вблизи указанной плоскости формируется один дополнительный максимум поглощения, соответствующий второму падению (штриховая кривая на рис. 5). Следует отметить, что в последнем случае

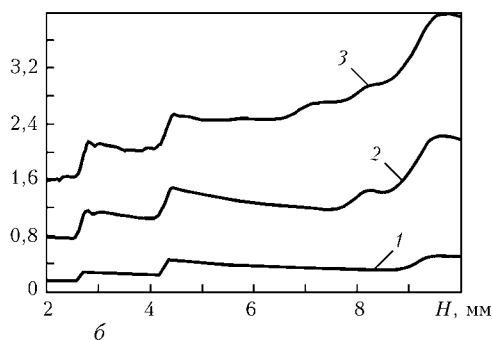
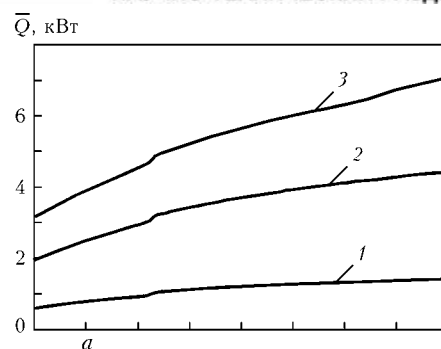


Рис. 6. Зависимость мощности излучения, поглощаемого металлом, от глубины парогазового канала для лазерного пучка с $\varphi_0 = 0$ (а) и $\pi/2$ (б) при различных значениях диаметра пучка в плоскости фокусировки: 1 – $d_F = 0,2$; 2 – $0,3$; 3 – $0,5$ мм

значительная часть поглощенной энергии (как при первом, так и при последующих отражениях) приходится на боковые стенки канала (см. рис. 4, б), где составляющая излучения с вектором электрического поля, лежащим в плоскости падения, дает заметный вклад в суммарное поглощение.

Данные, приведенные на рис. 6, свидетельствуют о существенном увеличении мощности излучения, поглощаемого поверхностью канала рассматриваемой формы, с увеличением диаметра d_F исходного лазерного пучка. Кроме того, наблюдается ступенчатое возрастание мощности излучения, поглощаемого в парогазовом канале, при увеличении его глубины, что можно связать с соответствующим возрастанием количества возможных отражений лучей исходного пучка (до их выхода из канала). Этот эффект особенно ярко проявляется при использовании лазерного излучения, поляризованного перпендикулярно направлению сварки (см. рис. 6, б, 7), поскольку, как указано

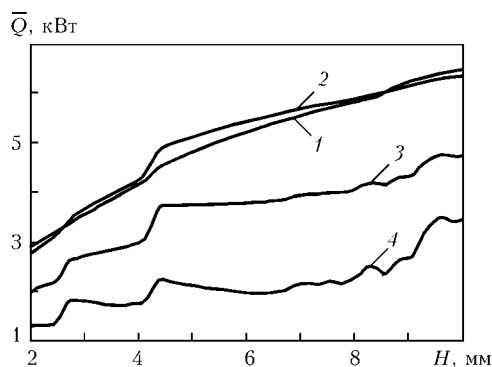


Рис. 7. Зависимость поглощаемой мощности от глубины канала при $d_F = 0,4$ мм и различных направлениях вектора поляризации излучения в исходном пучке: 1 – $\varphi_0 = 0$; 2 – $\pi/6$; 3 – $\pi/3$; 4 – $\pi/2$

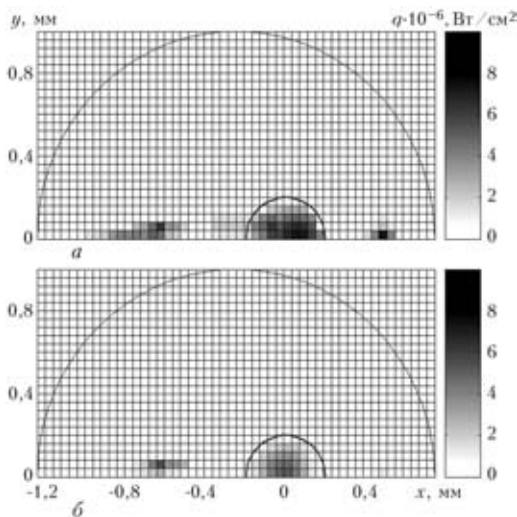


Рис. 8. Пространственное распределение теплового потока, вводимого в металл лазерным пучком с $d_F = 0,4$ мм и линейной поляризацией излучения: а, б — то же, что и на рис. 4

выше, пучок излучения с $\varphi_0 = \pi/2$ достаточно слабо поглощается при первом падении на поверхность канала. Что касается абсолютных значений \bar{Q} , то при $\varphi_0 = 0$ поглощаемая металлом мощность излучения почти вдвое превосходит соответствующие значения при $\varphi_0 = \pi/2$ (см. рис. 6, а, б), причем основное изменение происходит в диапазоне $\pi/6 \leq \varphi_0 \leq \pi/2$ (см. рис. 7).

На рис. 8, 9 приведены расчетные данные по распределению теплового потока при поглощении лазерного пучка в парогазовом канале иной формы:

$$1 - \frac{z}{H} = \left[\frac{(x + \Delta x)^2 + y^2}{R^2} \right]^2, \quad (29)$$

где $H = 10,0$ мм; $R = 1,0$ мм; $\Delta x = 0,25$ мм.

В данном случае лучи исходного пучка также испытывают многократные отражения в канале, однако здесь, в отличие от ранее рассмотренной формы канала, отраженные лучи могут давать существенный вклад в ту часть мощности излучения, которая поглощается его передней стенкой (ср. рис. 5, 9). При этом распределение $q[x, 0, z_s(x, 0)]$ в случае использования лазерного излучения, поляризованного в направлении сварки, оказывается подобным соответствующему распределению для излучения, поляризованного в перпендикулярном направлении, с той разницей, что тепловой поток и суммарная поглощаемая мощность в первом случае оказываются значительно выше.

В заключение можно отметить, что направление вектора поляризации излучения в лазерном пучке существенно влияет на его поглощение металлом в процессе лазерной сварки с глубоким проплавлением. В частности, лазерное излучение, поля-

Mathematical model has been developed to calculate space distribution of power of laser radiation absorbed by the surface of a keyhole in laser welding with deep penetration. The model allows for the effect of the initial beam focusing conditions, wavelength and polarisation of laser radiation on its absorption in the keyhole of an arbitrary shape, as well as multiple reflections of incident radiation from the keyhole surface. The developed model has shown that polarisation of laser radiation, shape and size of the keyhole have a substantial effect on distributed and integrated characteristics of absorption of the laser beam by metal welded.

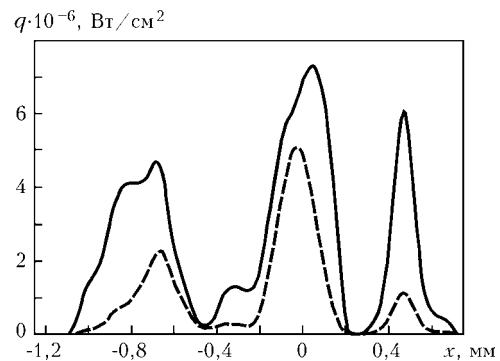


Рис. 9. Распределение теплового потока в плоскости $y = 0$ при $\varphi_0 = 0$ (сплошная кривая) и $\pi/2$ (штриховая); $d_F = 0,4$ мм

ризованное вдоль шва, поглощается почти вдвое эффективнее, чем поляризованное в перпендикулярном направлении. Таким образом, для повышения эффективности лазерной сварки целесообразно использовать лазерные пучки с линейной поляризацией излучения в направлении сварки.

Пространственное распределение теплового потока, вводимого лазерным пучком через поверхность парогазового канала, в значительной степени зависит от поляризации используемого излучения и может существенно отличаться от распределения интенсивности излучения в исходном пучке. Это необходимо учитывать при анализе процессов, протекающих на поверхности и в объеме сварочной ванны, а также расчете пространственно-временных распределений температуры металла в ЗТВ при лазерной сварке с глубоким проплавлением.

Поскольку форма и геометрические размеры парогазового канала оказывают сильное влияние на распределенные и интегральные характеристики поглощения лазерного пучка, для адекватного описания процесса лазерной сварки с глубоким проплавлением необходима разработка математической модели, позволяющей самосогласованным образом определять форму и размеры канала в зависимости от технологических параметров режима сварки, в том числе и поляризации лазерного излучения.

1. Воздействие лазерного излучения на материалы / Р. В. Арутюнян, В. Ю. Баранов, Л. А. Большов и др. — М.: Наука, 1989. — 367 с.
2. Miller J. C. Optical properties of liquid metals at high temperatures // Phil. Mag. — 1969. — 20. — P. 1115–1132.
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. — М.: Наука, 1982. — 620 с.
4. Лопота В. А., Сухов, Ю. Т., Туричин Г. А. Модель лазерной сварки с глубоким проплавлением для применения в технологии // Изв. РАН. Сер. Физика. — 1997. — 61, № 8. — С. 1613–1618.
5. Яров А. Квантовая электроника. — М.: Сов. радио, 1980. — 488 с.
6. О влиянии слоистых диэлектрических покрытий на поглощательные свойства ограниченных плазмонических сред // В. С. Гвоздецкий, А. Г. Загородний, И. В. Кривцун и др. // Радиотехника и электроника. — 1987. — 32, № 11. — С. 2372–2381.

Поступила в редакцию 22.09.2003