

УДК 621.378:535:539.375

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМЫ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКЕ МЕТАЛЛОВ.

1. ВЛИЯНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ГАУССОВА ПУЧКА НА ФОРМУ ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПОВЕРХНОСТИ

О. Б. Ковалев, А. В. Зайцев

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск
E-mails: kovalev@itam.nsc.ru, zaitsev@gorodok.net

Рассмотрена пространственная задача описания формы поверхности, образующейся в результате взаимодействия лазерного излучения с веществом в процессах лазерной резки металлов. Проанализировано влияние поляризации излучения (линейной, эллиптической и круговой) на коэффициент поглощения, для расчета которого предложена обобщенная формула, учитывающая пространственную ориентацию плоскости падения излучения. Численно исследовано влияние характеристик лазерного излучения на форму поверхности и глубину реза. Показано, что при генерации пучка с ТЕМ₀₀-модой предпочтительнее использовать эллиптическую поляризацию излучения с определенным соотношением полуосей, ориентированную по направлению перемещения луча.

Ключевые слова: лазерное излучение, поляризация, поглощение, металл, газолазерная резка, моделирование.

Введение. Теория разрушения поверхности материала, подверженного воздействию лазерного излучения [1–4], базируется на уравнении, описывающем эволюцию во времени формы поверхности. Вывод этого уравнения основан на условии кинематической совместности точек поверхности $\Phi(x, y, z, t) = 0$:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\partial\Phi}{\partial t} + V_n |\nabla\Phi| = 0, \quad \mathbf{N} = \frac{\nabla\Phi}{|\nabla\Phi|}, \quad (1)$$

где V_n — нормальная компонента скорости движения поверхности; \mathbf{N} — нормаль к поверхности.

В [1] обсуждается возможность вычисления нормальной компоненты скорости перемещения точек поверхности V_n через вектор Пойтинга, который определяется из решения уравнений Максвелла. Рассматривается только случай малого отклонения искомой поверхности от плоскости листа, что позволяет приближенно вычислять вектор Пойтинга. Коэффициент поглощения излучения поверхностью материала вычисляется приближенно, при этом рассматриваются только поперечная и продольная поляризации излучения.

В [2–4] для определения V_n используется локальный закон сохранения энергии

$$V_n = Q/L, \quad L = c_s^0 \rho_s^0 (T_m - T_0) + \rho_m H_m, \quad (2)$$

где Q — плотность мощности падающего излучения, поглощаемого элементом поверхности; L — энергия разрушения единицы объема (эта энергия приравнивается к энергии,

необходимой для того, чтобы материал нагреть от комнатной температуры T_0 до температуры плавления T_m и расплавить); ρ_s^0, c_s^0 — плотность и удельная теплоемкость металла при начальной температуре T_0 ; ρ_m — плотность при температуре плавления T_m ; H_m — удельная теплота плавления. Эти представления справедливы при идеальном удалении жидкой фазы газовым потоком, когда толщина оставшейся пленки жидкости пренебрежимо мала.

В [3, 4] приведен расчет формы поверхности при лазерной резке металлов с учетом различной поляризации луча применительно к толстым материалам (с большим отношением толщины пластины к ширине реза). Отмечается, что предельные параметры резки лучом с круговой поляризацией оказываются не хуже соответствующих параметров для линейной поляризации с поглощением P -волны во фронте. Эффективность резки повышается в 1,5–2 раза при использовании радиальной поляризации луча, которая получается наложением двух взаимно перпендикулярных ТЕМ₀₁-мод.

С такой оценкой эффективности использования радиальной поляризации (по отношению к круговой) трудно согласиться. Используемые в [3, 4] формулы для расчета коэффициента поглощения справедливы только для очень тонких листовых материалов. Генерация различно поляризованных ТЕМ₀₁-мод высокого качества в настоящее время еще недостаточно исследована. Генерация ТЕМ₀₁-моды неизбежно приводит к потере мощности излучения, увеличению диаметра пучка и ширины реза.

В [1–4] для решения уравнений (1), (2) используется метод характеристик, что не всегда удобно в практическом плане, так как при получении решений с большими градиентами или разрывами (в случае толстых материалов) требуется численно их выделять.

В данной работе проведен анализ влияния типа поляризации луча на коэффициент поглощения при пространственном взаимодействии излучения с произвольной поверхностью материала.

Постановка задачи. Проблема лазерного разрушения поверхности непрозрачных материалов осложнена многообразием взаимосвязанных физических процессов, детальное описание которых в настоящее время чрезвычайно затруднено [5]. Данная постановка задачи основана на следующих предположениях.

1. Энергия поглощенного излучения расходуется только на нагрев материала и его плавление. Испарением и взаимодействием излучения с парами металла пренебрегается.

2. Считается, что в условиях интенсивного поддува газа гидродинамические процессы внутри реза (удаление расплава) происходят мгновенно, при этом толщина оставшейся жидкой пленки пренебрежимо мала.

3. Удаление расплавленного металла осуществляется нейтральным газом так, что химические реакции, которые имеют место при резке с кислородом, не рассматриваются.

4. Потери тепла в твердом материале учитываются интегрально, скорость резки такова, что справедливо локально-одномерное распределение температуры в тонком слое вблизи поверхности реза.

5. Мощность лазерного излучения достаточно высока, и плотность поглощенной мощности Q превышает пороговое значение, при котором справедлива формула (2).

6. Не учитывается зависимость коэффициента поглощения излучения от температуры.

7. Поверхность материала, подверженного воздействию излучения, является гладкой. Регулярная шероховатость поверхности реза, характерная для реальных процессов, отсутствует.

8. Поглощением отраженного излучения пренебрегается, учитывается только однократное поглощение пучка.

С учетом этих предположений математическая формулировка задачи о разрушении поверхности материала под действием лазерного излучения сводится к уравнению кине-

матической совместности точек поверхности реза

$$\frac{\partial z_m}{\partial t} - V_c \frac{\partial z_m}{\partial x} = -V_n \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_m}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z_m}{\partial y}\right)^2}; \quad (3)$$

$$z_m(x, y, 0) = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial z_m}{\partial x}(-\infty, y, t) = \frac{\partial z_m}{\partial x}(\infty, y, t) = 0, \quad \frac{\partial z_m}{\partial y}(x, -\infty, t) = \frac{\partial z_m}{\partial y}(x, \infty, t) = 0, \quad (5)$$

где t — время; x, y, z — пространственные координаты; $z = z_m(x, y, t)$ — уравнение поверхности; V_c — скорость перемещения луча (или скорость резки), направление которой совпадает с осью Ox .

Для расчета нормальной составляющей скорости перемещения поверхности V_n будем использовать локальный закон сохранения (2), аналог которого с учетом температурных зависимостей плотности и теплоемкости материала получен в [5]:

$$V_n = Q / \left(\rho_m H_m + c_s^0 \rho_s^0 (T_m - T_0) \int_0^1 \nu(\bar{T}) d\bar{T} \right), \quad Q = AI(x, y, z) \cos \gamma. \quad (6)$$

Здесь A — коэффициент поглощения; $I(x, y, z)$ — плотность интенсивности излучения; γ — угол падения луча. Функция $\nu(\bar{T})$, где $\bar{T} = (T - T_0)/(T_m - T_0)$, учитывает температурную зависимость произведения плотности и теплоемкости металла [5].

Рассматривается постоянно действующее излучение CO₂-лазера с длиной волны $\lambda_0 = 10,6$ мкм. Интенсивность излучения описывается распределением Гаусса, что соответствует TEM₀₀-моду [6]:

$$I(x, y, z) = \frac{2W}{\pi\omega_z^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_z^2}\right), \quad \omega_z = \sqrt{\omega_0^2 + \left(\frac{(z - z_f)\lambda_0}{\pi\omega_0}\right)^2}, \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (7)$$

Здесь W — мощность излучения; z_f — расстояние от плоскости $z = 0$ до фокальной поверхности; ω_0 — радиус пучка в фокальной плоскости. Исходная структура пучка учитывает фокусировку линзы таким образом, что центр каустики может меняться относительно поверхности материала.

Коэффициенты отражения излучения R_S, R_P выражаются с помощью уравнений Френеля [7]:

$$R_S = \left| \frac{\cos \gamma - (N_\omega^2 - \sin^2 \gamma)^{1/2}}{\cos \gamma + (N_\omega^2 - \sin^2 \gamma)^{1/2}} \right|^2, \quad R_P = \left| \frac{N_\omega^2 \cos \gamma - (N_\omega^2 - \sin^2 \gamma)^{1/2}}{N_\omega^2 \cos \gamma + (N_\omega^2 - \sin^2 \gamma)^{1/2}} \right|^2. \quad (8)$$

Здесь R_S, R_P — коэффициенты отражения для поперечной (S) и продольной (P) волн излучения. Показатель преломления $N_\omega = n_\omega + ik_\omega$ является комплексным числом (n_ω — коэффициент преломления; k_ω — проводимость материала).

Линейная поляризация излучения. Рассмотрим случай линейной поляризации гауссова пучка. На рис. 1 показан элемент поверхности, расположенной под углом γ к оси Ox декартовой системы координат (x, y, z) . Волновые векторы падающего \mathbf{k} и отраженного \mathbf{k}_R излучений и единичный вектор нормали \mathbf{N} к поверхности образуют плоскость падения. Вектор напряженности электрического поля \mathbf{E} разлагается на две проекции. Проекция \mathbf{E}_P , лежащей в плоскости падения, соответствует коэффициенту отражения R_P , а проекция \mathbf{E}_S , ориентированной нормально к плоскости падения, соответствует коэффициенту отражения R_S . Пусть β — угол между вектором \mathbf{E} и нормалью к плоскости падения $\mathbf{N}_{kn} = \mathbf{N} \times \mathbf{k}/|\mathbf{k}|$, тогда $E_P = E \sin \beta$, $E_S = E \cos \beta$. Поскольку направление \mathbf{k} совпадает

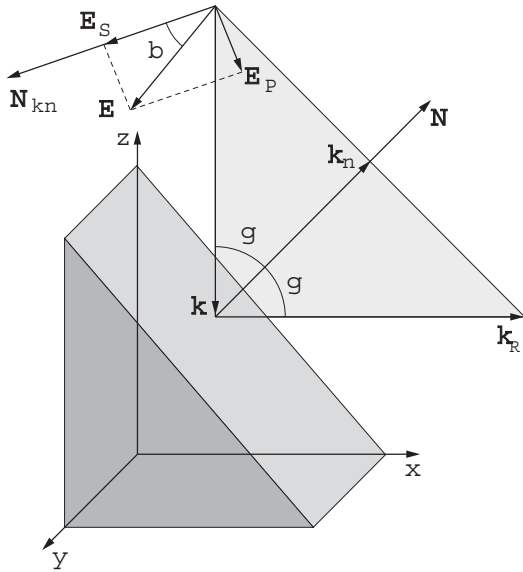


Рис. 1

Рис. 1. Схема взаимодействия светового луча с элементом поверхности

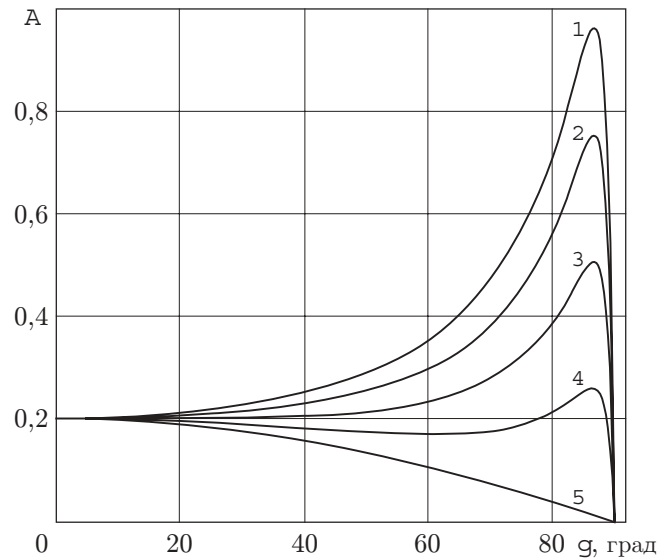


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость коэффициента поглощения от угла падения γ при различных значениях β :

1 — $\beta = 90^\circ$; 2 — $\beta = 60^\circ$; 3 — $\beta = 45^\circ$; 4 — $\beta = 30^\circ$; 5 — $\beta = 0$

с ортом e_z (излучение падает параллельно оси Oz), а вектор \mathbf{E} перпендикулярен (или параллелен) перемещению луча, то $\cos^2 \beta = N_x^2$ (или $\cos^2 \beta = N_y^2$), где N_x, N_y — компоненты вектора нормали к поверхности. Согласно [8] выражение для коэффициента поглощения записывается в виде

$$A(\beta, \gamma) = 1 - R(\beta, \gamma) = 1 - I_r/I_0 = 1 - E_r^2/E^2 = 1 - (R_P E_P^2 + R_S E_S^2)/E^2 = 1 - R_S \cos^2 \beta - R_P \sin^2 \beta, \quad (9)$$

где I_r, I_0 — интенсивности отраженного и падающего излучений, пропорциональные квадратам напряженностей электрических полей E_r и E соответственно.

На рис. 2 приведена зависимость коэффициента поглощения $A(\beta, \gamma)$. Видно, что при $\beta = \pi/2$ излучение поляризовано параллельно плоскости падения, что соответствует максимуму коэффициента поглощения. С уменьшением угла β параллельная поляризация пучка монотонно переходит к перпендикулярной поляризации, которая при $\beta = 0$ соответствует минимуму коэффициента поглощения.

Эллиптическая поляризация излучения. Рассмотрим случай эллиптической поляризации пучка, когда конец вектора \mathbf{E} в плоскости (x, y) описывает эллипс с полуосями a и b , расположенными параллельно осям Ox и Oy . При этом выполняется соотношение $a^2 + b^2 = 1$. Коэффициент поглощения запишем в виде $A = a^2 A_x + b^2 A_y$, где A_x, A_y — коэффициенты поглощения для излучения, линейно поляризованного параллельно осям Ox и Oy . Согласно (9) можно записать формулы

$$\begin{aligned} A_x(\gamma, \beta_x) &= 1 - R_S(\gamma) \cos^2 \beta_x - R_P(\gamma) \sin^2 \beta_x, \\ A_y(\gamma, \beta_y) &= 1 - R_S(\gamma) \cos^2 \beta_y - R_P(\gamma) \sin^2 \beta_y, \end{aligned} \quad (10)$$

где β_x, β_y — углы между нормалью к плоскости падения \mathbf{N}_{kn} и осями Ox и Oy соответственно. Для углов β_x и β_y имеют место следующие равенства:

$$\begin{aligned}\cos^2 \beta_x &= ((\mathbf{k}/|\mathbf{k}| \times \mathbf{N})\mathbf{e}_x)^2 = (\mathbf{N}, \mathbf{e}_y)^2 = N_y^2, \\ \cos^2 \beta_y &= ((\mathbf{k}/|\mathbf{k}| \times \mathbf{N})\mathbf{e}_y)^2 = (\mathbf{N}, \mathbf{e}_x)^2 = N_x^2.\end{aligned}\quad (11)$$

Подставляя (11) в (10), получим выражение для коэффициента поглощения в случае эллиптической поляризации

$$A(\gamma, \mathbf{N}) = a^2 A_x + b^2 A_y = 1 - R_S(a^2 N_y^2 + b^2 N_x^2) - R_P(a^2(1 - N_y^2) + b^2(1 - N_x^2)). \quad (12)$$

Коэффициент поглощения A сильно зависит от угла падения, пространственной ориентации вектора нормали к поверхности и поляризации излучения, которая характеризуется отношением полуосей $\xi = b/a$.

Круговая поляризация излучения. При $a = b = 1/\sqrt{2}$ имеем круговую поляризацию излучения. С учетом равенства $N_x^2 + N_y^2 + N_z^2 = 1$ из (12) получаем

$$A_c = 1 - [R_S(1 - N_z^2) + R_P(1 + N_z^2)]/2. \quad (13)$$

Пусть поверхность разрезаемого материала такова, что фронт реза и боковые стенки мало отклоняются от вертикали. Для тонких листов (толщиной $h = 1 \div 3$ мм) это обстоятельство экспериментально подтверждается. В этом случае компонента N_z вектора нормали \mathbf{N} близка к нулю. Тогда из (13), полагая $N_z = 0$, получаем $A_c = 1 - 0,5(R_S + R_P)$. Это известная и широко используемая формула для приближенной оценки коэффициента поглощения при круговой поляризации [1–5, 9–11].

Таким образом, соотношение (12) позволяет рассчитывать коэффициент поглощения для эллиптической, круговой и линейной поляризаций луча в общем случае произвольной поверхности материала.

Результаты расчетов и их обсуждение. Уравнение (3) с начальными (4), граничными (5) условиями и замыкающими соотношениями (6)–(8), (12) решалось численно методом установления по явной конечно-разностной схеме со вторым порядком аппроксимации на равномерной сетке. В рамках поставленной задачи поверхность реза отсчитывается от верхней плоскости металлического листа ($z = 0$) до предельной глубины разрушения материала ($z < 0$). Основная часть излучения, взаимодействуя с металлом, падает на поверхность реза под большими углами. Главной особенностью при этом является сильная зависимость коэффициента поглощения от угла падения (см. рис. 2).

На рис. 3 в безразмерных переменных представлены проекции формы реза в плоскости (z, y) для случаев линейной и круговой поляризаций луча. Соответствующие изолинии поглощенной мощности $Q(x, y, z_m(x, y))$ в плоскости (x, y) приведены на рис. 4. Штриховая линия соответствует радиусу луча $\omega_0 = 100$ мкм. Безразмерный параметр $\sigma = 2W/[\pi\omega_0^2 V_c(\rho_m H_m + \rho_s^0 c_s^0(T_m - T_0))]$, характеризующий степень энергетического воздействия на материал, равен 300, что соответствует мощности $W = 2$ кВт и скорости резки $V_c = 44$ мм/с.

В случае резки S -поляризованным излучением ($\xi = \infty$), когда вектор напряженности электрического поля перпендикулярен направлению перемещения луча, максимум поглощения излучения находится на боковых стенках (рис. 4,а), при этом коэффициент поглощения на фронте реза примерно такой же, что и на боковых стенках. Рез получается широкий, с гладкой поверхностью и глубиной порядка 1 мм (см. рис. 3,а).

В случае резки P -поляризованным излучением ($\xi = 0$) вектор \mathbf{E} параллелен направлению перемещения луча (см. рис. 3,б), максимум плотности поглощаемой мощности находится на фронте реза (см. рис. 4,б) там, где излучение падает под углом $\gamma \approx 85 \div 87^\circ$. Рез получается узкий с максимальной глубиной около 2 мм, так как большая часть излучения не проникает в глубь реза, отражаясь от его фронта. На рис. 3,б видны неоднородности поверхности счетного характера, обусловленные высоким градиентом поглощаемой

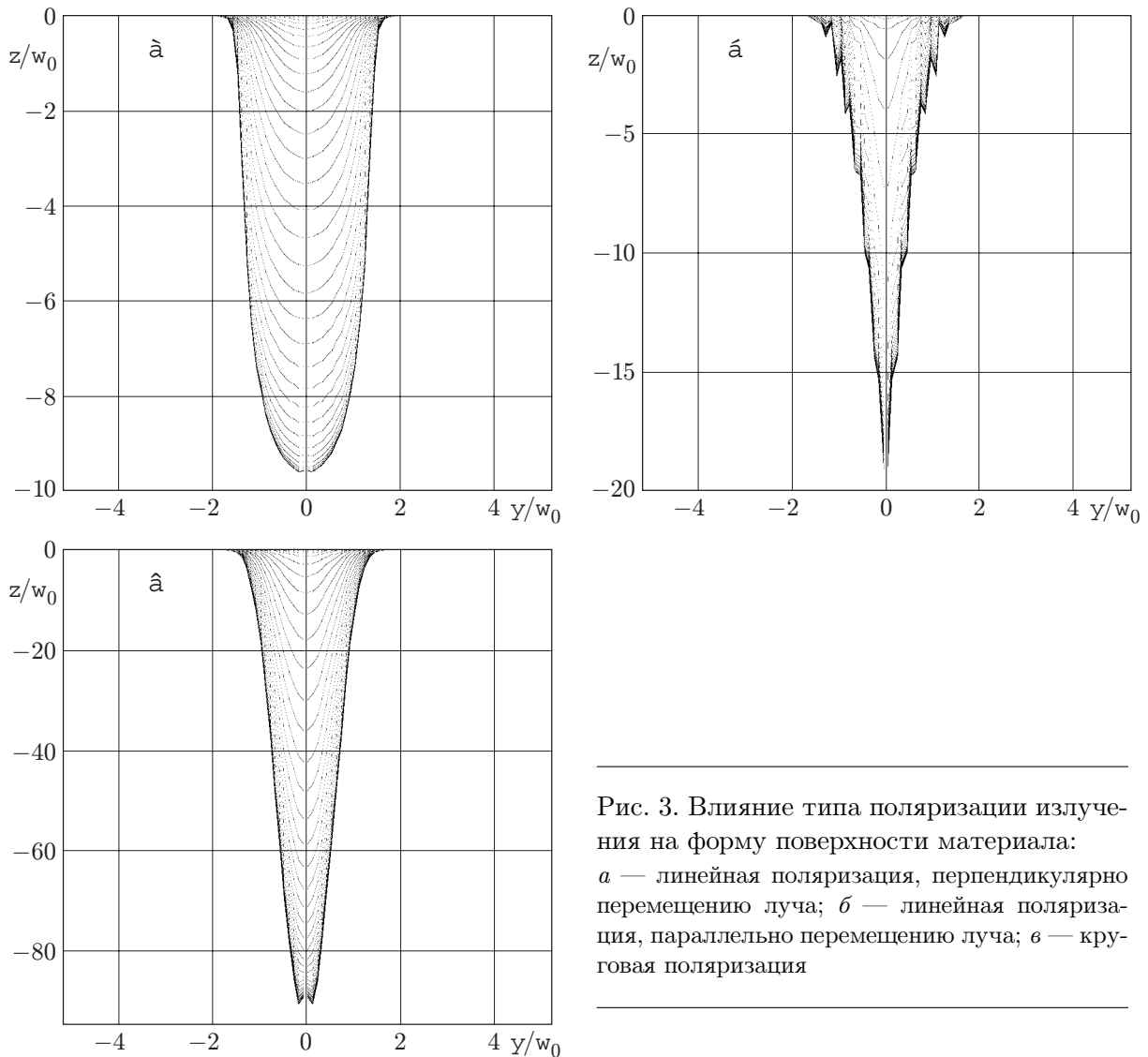


Рис. 3. Влияние типа поляризации излучения на форму поверхности материала:
a — линейная поляризация, перпендикулярно перемещению луча; *b* — линейная поляризация, параллельно перемещению луча; *v* — круговая поляризация

мощности в окрестности фронта реза, для устранения которых необходимо использовать численный метод высокого порядка точности.

При круговой поляризации (см. рис. 3, *v*) поглощенное излучение распределено по поверхности относительно равномерно (см. рис. 4, *в*), форма боковой поверхности эволюционирует к вертикали, что дает максимальную глубину реза 9 мм. Во всех случаях облучаемая поверхность стремится принять форму, которая обеспечивает минимальное поглощение излучения.

На рис. 5 в безразмерных переменных ($L/\omega_0, b/a$) представлены результаты серии вычислительных экспериментов по определению максимальной глубины реза L в зависимости от отношения b/a . В расчетах варьировались значения безразмерного комплекса σ . Оказалось, что максимальная глубина реза при круговой поляризации ($b/a = 1$) значительно больше, чем при линейной ($b/a = 0, \infty$). Максимум на кривых соответствует эллиптически поляризованному лучу с отношением полуосей $b/a = 0,75 \div 0,80$.

Заключение и выводы. Рассмотрена задача описания формы поверхности, образующейся при лазерной резке металлов мощным потоком излучения с TEM_{00} -модой. Иссле-

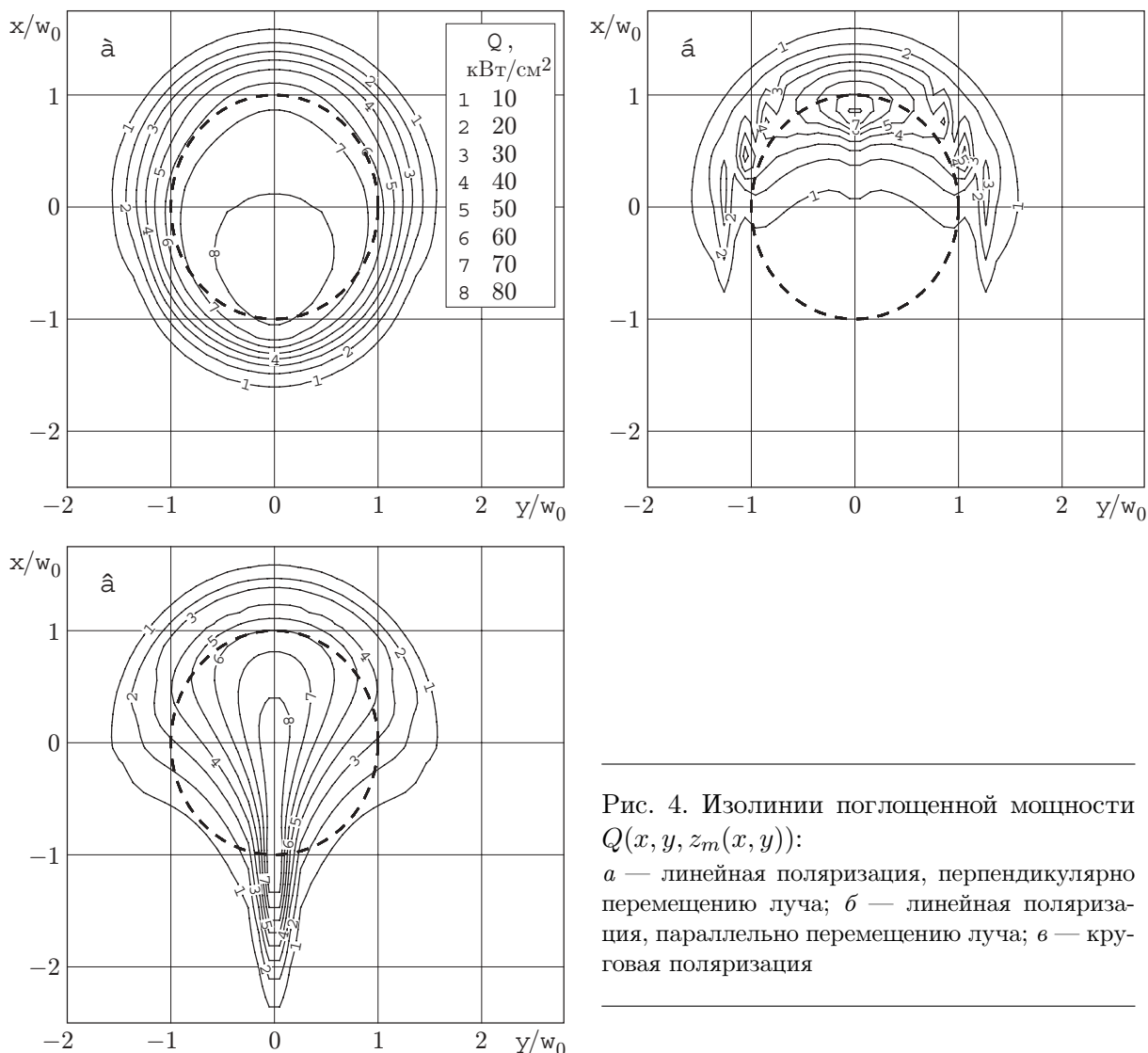


Рис. 4. Изолинии поглощенной мощности $Q(x, y, z_m(x, y))$:
a — линейная поляризация, перпендикулярно перемещению луча; *б* — линейная поляризация, параллельно перемещению луча; *в* — круговая поляризация

дованы случаи линейной, эллиптической и круговой поляризаций луча. Для расчета коэффициента поглощения предложена функциональная зависимость (12), которая учитывает пространственную ориентацию плоскости падения, что важно для резки толстых материалов с большим отношением глубины реза к диаметру гауссова пучка. Формула (12) позволяет рассчитывать коэффициент поглощения в случае эллиптической поляризации луча с эллиптичностью, ориентированной либо перпендикулярно ($a < b$), либо параллельно ($a > b$) перемещению луча. При этом тип поляризации в зависимости от отношения полуосей эллипса ($\xi = b/a$) монотонно переходит от линейного (с поглощением P -волны при $\xi = 0$ или S -волны при $\xi = \infty$ во фронте) к эллиптическому ($\xi < 1, \xi > 1$) и круговому ($\xi = 1$). Численно исследовано влияние характеристик лазерного излучения на форму поверхности и глубину реза. Показано, что максимально эффективным является излучение с эллиптической поляризацией с определенным соотношением полуосей ($\xi \approx 0,75$), ориентированной по направлению перемещения луча.

В литературе (см., например, [9–11]) и среди специалистов по лазерной обработке металлов существует общее мнение, что наиболее эффективно практическое использование

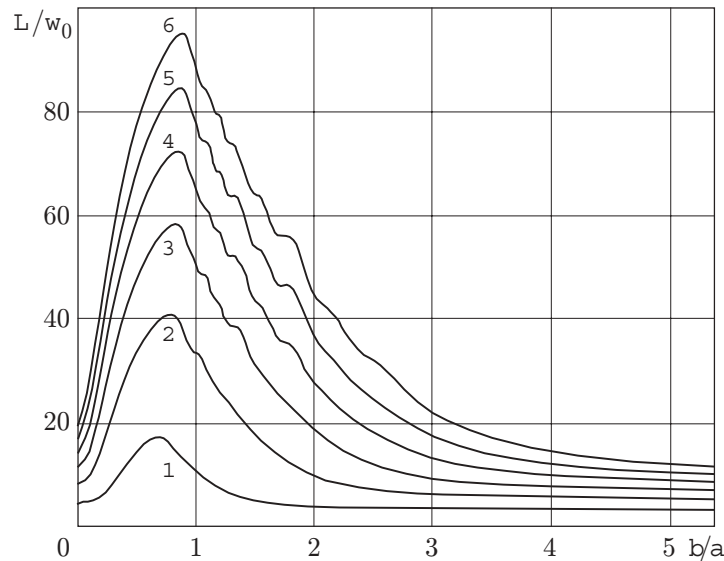


Рис. 5. Зависимость максимальной глубины реза L/ω_0 от поляризации луча b/a :
 1 — $\sigma = 50$; 2 — $\sigma = 100$; 3 — $\sigma = 150$; 4 — $\sigma = 200$; 5 — $\sigma = 250$; 6 — $\sigma = 300$

линейно поляризованного излучения с поглощением P -волны во фронте. Результаты проведенных расчетов (см. рис. 3–5) показали следующее. Во-первых, эффективность круговой поляризации излучения выше по сравнению с линейной (P -волной), что согласуется с расчетными данными [3–4] и проведенным в [3] анализом известных экспериментов. Заметим, что в современных технологиях лазерной резки обычно используется луч с круговой поляризацией. Это связано с техническими трудностями по управлению плоскостью поляризации вектора электрического поля при резке деталей сложных конфигураций [10]. Во-вторых, эффективность эллиптической поляризации может быть даже выше круговой. Поэтому на практике более выгодно производить прямолинейную резку листовых материалов эллиптически поляризованным лучом.

Авторы выражают благодарность А. М. Оришичу и В. Б. Шулятьеву за обсуждение результатов и полезные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веденов А. А., Иванов О. П., Черняков А. Л. Теория разрушения поверхности непрозрачных материалов лазерным излучением // Квантовая электроника. 1984. Т. 11, № 12. С. 2397–2404.
2. Черепанов Г. П., Черепанов А. Г. О форме и глубине реза лазерным лучом // Физика и химия обраб. материалов. 1990. № 2. С. 133–137.
3. Нестеров А. В., Низьев В. Г. Особенности резки металлов лазерным лучом с осесимметричной поляризацией // Изв. РАН. Сер. физ. 1999. Т. 63, № 10. С. 2039–2046.
4. Niziev V. G., Nesterov A. V. Influence of beam polarization on laser cutting efficiency // J. Phys. D. Appl. Phys. 1999. V. 32. P. 1455–1461.
5. Ковалев О. Б., Оришич А. М., Фомин В. М., Шулятьев В. Б. Сопряженные задачи механики сплошных сред в процессах газолазерной резки металлов // ПМТФ. 2001. Т. 42, № 6. С. 106–116.
6. Ораевский А. Н. Гауссовы пучки и оптические резонаторы // Тр. Физ. ин-та им. П. Н. Лебедева. М.: Наука, 1988. Т. 187. С. 3–59.

7. **Stuart E., Rutt H. N.** Selection criteria for polarising mirrors for use in high-power CO₂-lasers // J. Phys. D. Appl. Phys. 1989. V. 22. P. 901–905.
8. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики. М.: Наука, 1970.
9. **Веденов А. А., Гладуш Г. Г.** Физические процессы при лазерной обработке материалов. М.: Энергоатомиздат, 1985.
10. **Григорьянц А. Г.** Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989.
11. **Pawell J.** CO₂-laser cutting. L.: Springer-Verlag, 1998.

*Поступила в редакцию 29/IX 2003 г.,
в окончательном варианте — 30/IV 2004 г.*
