

УДК 621.378:535:539.375

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМЫ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКЕ МЕТАЛЛОВ. 2. МОДЕЛЬ МНОГОКРАТНОГО ОТРАЖЕНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

О. Б. Ковалев, А. В. Зайцев

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

Предложена физическая модель многократного отражения сфокусированного лазерного излучения при его распространении в узких каналах и щелях применительно к процессам лазерной обработки металлов. На основе законов геометрической оптики с использованием траекторного метода разработан алгоритм расчета формы поверхности, образующейся при взаимодействии лазерного излучения с металлом. Используемый метод позволяет описать передачу энергии в глубь канала при моделировании процессов лазерной обработки (сверления, резки, сварки). Показано, что эффективность многократного отражения наиболее существенна при резке толстых материалов с большим отношением толщины пластины к диаметру гауссова пучка.

**Ключевые слова:** излучение, лазерная обработка, многократное отражение, математическое моделирование.

**Введение.** Современные методы моделирования взаимодействия мощных потоков лазерного излучения с металлами основаны на предположении, что учитывается только однократное поглощение излучения [1–3]. При этом считается, что отраженное излучение не вносит существенного вклада в разрушение материала и диссипирует в металле за счет теплопроводности. Визуальные наблюдения реальных процессов лазерной обработки [4] показывают, что имеет место многократное поглощение излучения при его распространении внутри лазерного реза или каверны, особенно в случае толстых (толщиной  $h \geq 10$  мм) материалов.

Вопросы моделирования многократного отражения излучения ранее неоднократно обсуждались (см., например, [5–8]). Однако предложенные модели и методы описания не являются самосогласованными, так как основаны на интегральных законах сохранения, записанных для заранее заданной и не изменяющейся во времени формы реза.

**Постановка задачи.** Известно, что сфокусированное лазерное излучение распространяется в виде электромагнитных колебаний и имеет форму гауссова пучка, соответствующую приближенному частному решению уравнений Максвелла [9]. При отражении гауссова пучка от произвольной поверхности его форма может значительно измениться, при этом существенны волновые свойства излучения. Корректная постановка задачи о взаимодействии электромагнитного излучения с произвольной поверхностью металла осложнена необходимостью решения полных уравнений электродинамики. Ниже предложены упрощенная модель и алгоритм, позволяющий рассчитать степень влияния многократного отражения и поглощения излучения на форму поверхности при лазерном сверлении и резке металлов.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 04-01-00798).

За основу взята традиционная постановка задачи [2, 3], в которой форма поверхности  $z = z_m(x, y, t)$  определяется из решения уравнения кинематической совместности ее точек. Форма поверхности изменяется во времени под действием сфокусированного и постоянно действующего лазерного излучения. Нормальная составляющая скорости перемещения поверхности  $V_n$  определяется отношением плотности мощности излучения, поглощенного элементом поверхности  $Q$ , к энергии, затраченной на разрушение материала:

$$V_n = Q/(\rho_m H_m + c_s^0 \rho_s^0 (T_m - T_0)), \quad Q = AI(x, y, z) \cos \gamma. \quad (1)$$

Здесь  $x, y, z$  — пространственные координаты;  $\rho_m$  — плотность материала при температуре плавления  $T_m$ ;  $H_m$  — удельная теплота плавления;  $\rho_s^0, c_s^0$  — плотность и удельная теплоемкость материала при начальной температуре  $T_0$ ;  $A$  — коэффициент поглощения;  $I(x, y, z)$  — интенсивность излучения;  $\gamma$  — угол падения луча.

Рассматривается круговая поляризация гауссова пучка, для которой коэффициент поглощения излучения зависит от отражательных свойств материала и ориентации плоскости падения в пространстве [3]:

$$A_c = 1 - 0,5(R_S(1 - N_z^2) + R_P(1 + N_z^2)), \quad (2)$$

где  $R_S(\gamma), R_P(\gamma)$  — коэффициенты отражения для поперечной ( $S$ ) и продольной ( $P$ ) волн излучения;  $N_z$  — проекция на ось  $Oz$  вектора нормали к поверхности материала.

Предлагаемая физико-математическая модель расчета формы поверхности, учитывающая многократное отражение излучения, отличается от традиционной [3] тем, что нормальная составляющая скорости перемещения поверхности  $V_n$  выражается через сумму всей многократно поглощенной мощности  $Q$  в каждой ее точке. Для вычисления  $Q(x, y, z_m(x, y, t))$  используется траекторный метод, заключающийся в том, что распределение интенсивности гауссова пучка подвергается конечно-элементной дискретизации. В фокальной плоскости гауссова пучка с радиусом  $\omega_0$  выделяется область, в 2–3 раза превышающая диаметр пучка. Эта область разбивается на конечные элементы размерами  $h_x \times h_y$  ( $h_x, h_y$  — шаги дискретизации по осям  $x, y$ ). Каждый из элементов представляет собой световой луч с координатами  $x_{k_i}, y_{k_i}, z_{k_i}$ , содержащий энергию излучения  $E_{k_i} = I(x_{k_i}, y_{k_i}, z_{k_i})h_x h_y$ . Вектор перемещения луча совпадает с волновым вектором  $\mathbf{k}_i$ .

Первоначально лучи движутся по траекториям, совпадающим с формой гауссова пучка. При взаимодействии с поверхностью траектория каждого луча изменяет свое направление по закону геометрической оптики (угол падения равен углу отражения). При этом переносимая лучом энергия уменьшается на величину энергии, поглощенной поверхностью металла. Предполагается, что после отражения круговая поляризация излучения сохраняется. На рис. 1 представлена схема двух отражений светового луча от свободной поверхности. Волновые векторы падающего  $\mathbf{k}_{0i}$  и отраженного  $\mathbf{k}_{1i}$  излучений находятся в одной плоскости с вектором нормали к поверхности  $\mathbf{N}_1$  и образуют плоскость падения. Направление отраженного излучения  $\mathbf{k}_{1i}$  определяется из векторного соотношения  $\mathbf{k}_{1i} = \mathbf{k}_{0i} - 2(\mathbf{N}_1, \mathbf{k}_{0i})\mathbf{N}_1$ . Поглощенная мощность  $Q(x, y, z_m(x, y, t))$  вычисляется в виде матрицы  $Q_{ij}$ . Так, для двух отражений, показанных на рис. 1, получаем

$$\begin{aligned} Q_{i1j1} &:= Q_{i1j1} + A_c(\gamma_1)E_{0i}, & E_{1i} &= E_{0i}(1 - A_c(\gamma_1)), & \mathbf{k}_{1i} &= \mathbf{k}_{0i} - 2(\mathbf{N}_1, \mathbf{k}_{0i})\mathbf{N}_1, \\ Q_{i2j2} &:= Q_{i2j2} + A_c(\gamma_2)E_{1i}, & E_{2i} &= E_{1i}(1 - A_c(\gamma_2)), & \mathbf{k}_{2i} &= \mathbf{k}_{1i} - 2(\mathbf{N}_2, \mathbf{k}_{1i})\mathbf{N}_2, \end{aligned}$$

где знак “:=” означает присваивание (при каждом отражении луча значение  $Q_{ij}$  увеличивается на величину поглощенной энергии).

Численный алгоритм предусматривал сглаживание полученной дискретной функции  $Q_{ij}$ . Для расчета координат точек пересечения траекторий световых лучей с подвижной поверхностью материала использовался метод аппроксимации поверхности с помощью эрмитовых кубических сплайнов [10].

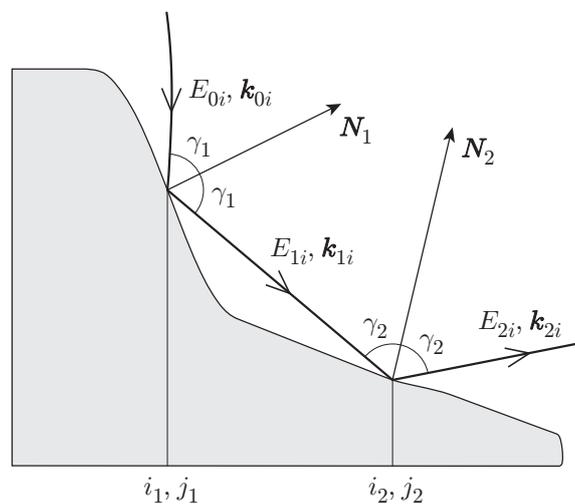


Рис. 1. Траектория перемещения светового луча и схема двух его отражений от свободной поверхности

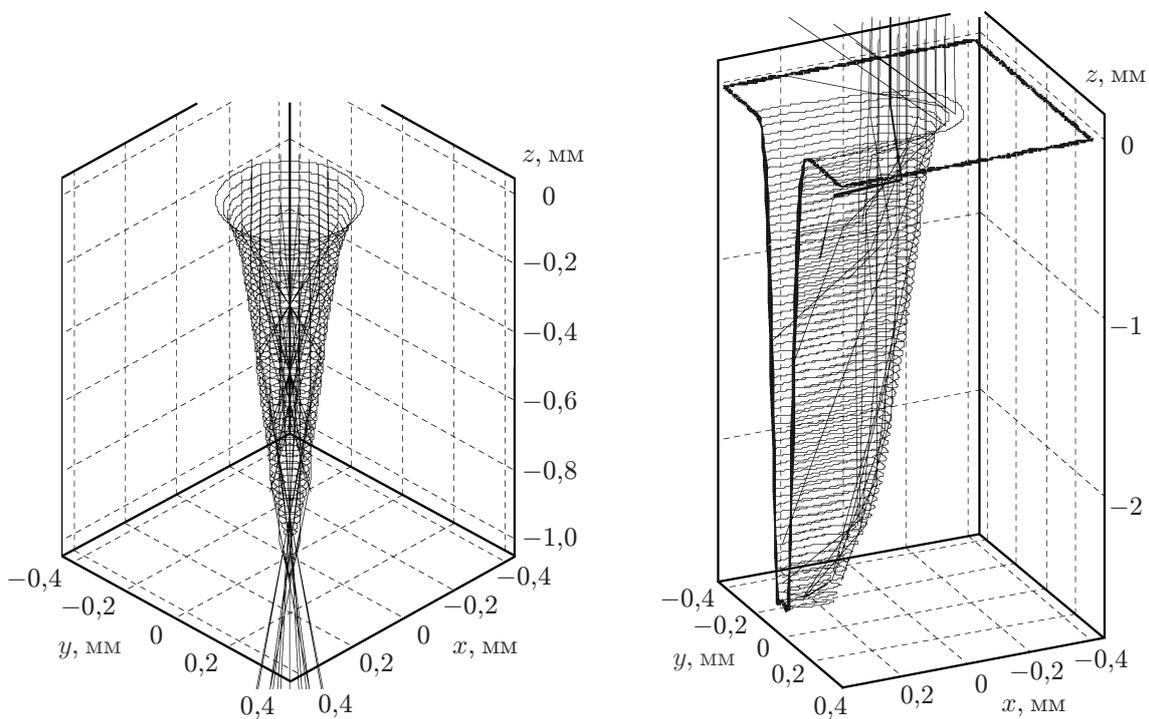


Рис. 2

Рис. 3

Рис. 2. Распространение излучения в камере при лазерном сверлении металла

Рис. 3. Распространение излучения в канале реза при лазерной резке металла

**Результаты расчетов.** На рис. 2 представлены результаты расчета взаимодействия гауссова пучка в канале отверстия, полученного при лазерном сверлении стальной пластины толщиной  $h = 1$  мм. Мощность излучения  $W = 1$  кВт, глубина заглабления фокуса  $z_f = 0,25$  мм, радиус фокальной плоскости пучка  $\omega_0 = 100$  мкм. На рис. 3 дана пространственная картина распространения пучка излучения в канале разреза при максимальной глубине прорезания металлической пластины. Мощность  $W = 1$  кВт, скорость резки  $V_c = 0,17$  м/с, глубина заглабления фокуса  $z_f = 0,25$  мм, радиус фокальной плоскости пучка  $\omega_0 = 100$  мкм. Горизонтальные линии уровня соответствуют контуру получающейся поверхности. Видно, что световые лучи многократно отражаются от внутренней поверхности канала. Общее количество лучей, на которые разбивался пучок, порядка 10 000, на рисунках приведены только наиболее характерные из них.

Для сравнения на рис. 4 представлены меридиональные сечения отверстия в плоскости  $(x, z)$  без учета отражения (рис. 4, *a, в*) и с учетом отражения (рис. 4, *б, г*). Видно, что при сверлении отражений было больше, чем при резке. Однако форма отверстия не изменилась, потому что отражаются только периферийные лучи пучка, несущие малое количество энергии. В случае резки с учетом многократного отражения во фронте реза максимальная глубина заметно увеличилась (рис. 4, *г*). Формы полученных отверстия и ре-

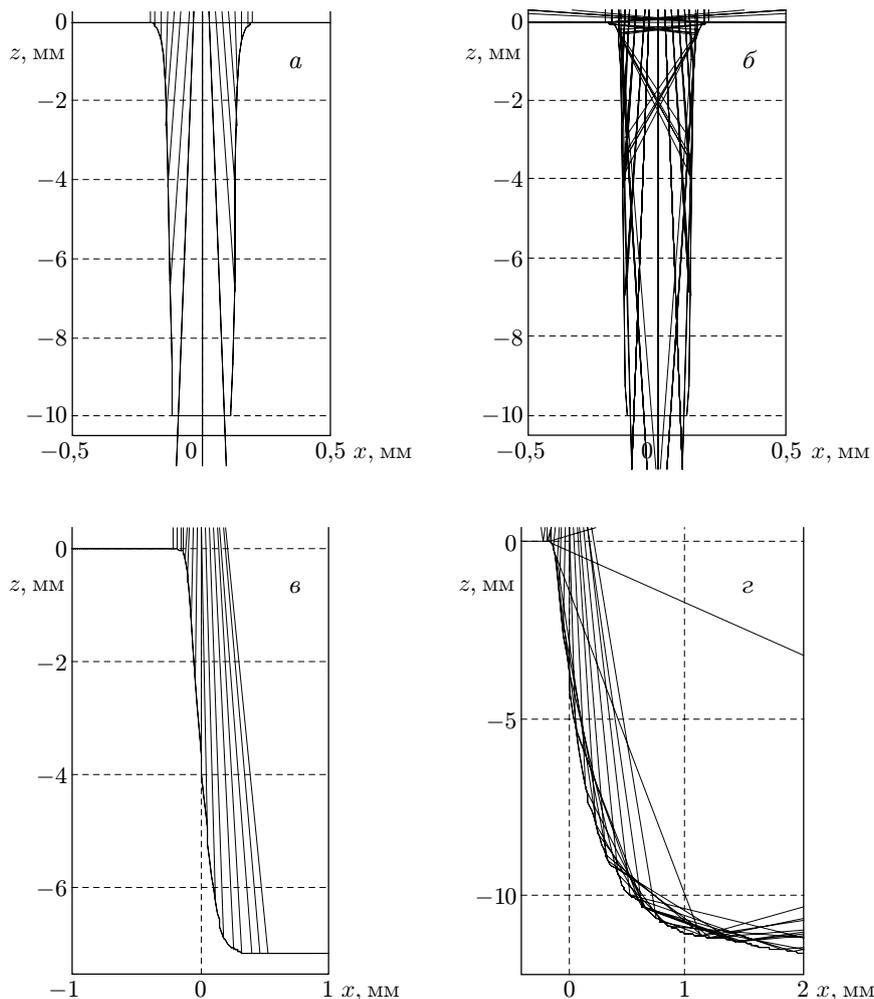


Рис. 4. Форма отверстия (*a, б*) при лазерном сверлении и форма реза (*в, г*) при лазерной резке без учета отражения (*a, в*) и с учетом отражения (*б, г*)

за качественно согласуются с наблюдаемыми в натуральных экспериментах, проводимых на лазерном технологическом комплексе по раскрою и сверлению различных материалов [4].

**Заключение.** Теоретически исследовано многократное поглощение лазерного излучения при его распространении в узком канале. Предложена физико-математическая модель объемного взаимодействия лазерного излучения с металлом с учетом его многократного отражения. На основе траекторного метода и законов геометрической оптики разработаны алгоритм и программа расчета многократного отражения излучения в узких каналах и щелях применительно к процессам лазерной обработки металлов. Показано, что влияние многократного отражения проявляется в большей степени при лазерной резке, при этом увеличивается максимальная глубина реза. Предложенная модель многократного отражения позволяет учесть процесс передачи энергии в глубь канала, что представляется важным при описании процессов лазерной обработки (сверления, резки, сварки) толстых материалов.

Разработанный алгоритм следует рассматривать как приближенный, так как после первого отражения гауссова пучка волновые свойства излучения не учитываются, хотя численный алгоритм, предполагающий сглаживание поглощенной мощности, частично устраняет этот недостаток физической модели.

Авторы выражают благодарность А. М. Оришичу за постановку задачи и В. М. Фомину за многократное обсуждение результатов и полезные замечания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Cai L., Sheng P.** Analysis of laser evaporative and fusion cutting // J. Manufacturing Sci. Engng. 1996. V. 118. P. 225–234.
2. **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.
3. **Ковалев О. Б., Зайцев А. В.** Моделирование формы свободной поверхности при лазерной резке металлов. 1. Влияние поляризации гауссова пучка на форму образующейся поверхности // ПМТФ. 2004. Т. 45, № 6. С. 169–177.
4. **Малов А. Н., Малов Н. А., Оришич А. М., Шулятьев В. Б.** Резка толстых металлических пластин излучением CO<sub>2</sub>-лазера с самофильтрующим резонатором // Материалы IV междунар. науч.-техн. конф. “Лазерные технологии и средства их реализации”, Санкт-Петербург, 24–26 сент. 2003 г. СПб.: Изд-во СПб. ГПУ, 2004. С. 39–46.
5. **Minamida K., Takaafuji H., Hamada N., et al.** Wedge shape welding with multiple reflecting effect of high power CO<sub>2</sub>-laser beam // The changing frontiers of laser materials processing / Ed. by C. M. Banas, G. L. Whitney. UK: IFS (Publ.) Ltd, 1986. P. 97–104.
6. **Milewski J., Sklar E.** Modeling and validation of multiple reflections for enhanced laser welding // Modeling Simul. Mater. Sci. Engng. 1996. V. 4. P. 305–322.
7. **Duan J., Man H. C., Yue T. M.** Modeling the laser fusion cutting process. 1. Mathematical modeling of the cut kerf geometry for laser fusion cutting of thick metal // J. Phys. D. Appl. Phys. 2001. V. 34. P. 2127–2134.
8. **Kaplan A.** A model of deep penetration laser welding based on calculation of the keyhole profile // J. Phys. D. Appl. Phys. 1994. V. 27. P. 1805–1814.
9. **Ораевский А. Н.** Гауссовы пучки и оптические резонаторы // Тр. Физ. ин-та им. П. Н. Лебедева. М.: Наука, 1988. Т. 187. С. 3–59.
10. **Завьялов Ю. С., Квасов Б. И., Мирошниченко В. Л.** Методы сплайн-функций. М.: Наука, 1980.

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