

¹ *Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия*

² *Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия*

zaitsev@itam.nsc.ru; kovalev@itam.nsc.ru; Smirnova-em@bk.ru

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВОГО (CO₂) И ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРОВ НА ФОРМУ И ГЛУБИНУ РАЗРУШАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА

На основе модельных представлений о взаимодействии лазерного излучения с металлами представлены результаты расчетно-теоретического исследования влияния длины волны излучения λ с круговой поляризацией пучка на форму разрушаемой поверхности листовой нержавеющей стали при варьировании мощности лазера и толщины материала. Особое внимание уделено сравнительному анализу эффективности разрушения металла при лазерной резке газовым (CO₂ с $\lambda = 10,6$ мкм) и волоконным ($\lambda = 1,07$ мкм) лазерами, широко используемыми в настоящее время в лазерных технологических комплексах по раскрою различных листовых материалов.

Ключевые слова: лазерная резка, металл, поглощение излучения, длина волны, форма реза, моделирование.

Введение

Физическая картина разделения листовых материалов лазерным излучением весьма сложна. Оптимизация процесса возможна только на основе глубокого понимания физических процессов и их взаимодействия. Процесс разрушения лазером металла зависит от количества образовавшегося расплава, его температуры, скорости плавления и испарения. Изменяя параметры излучения: плотность мощности, диаметр пучка, его фокусировку и время воздействия на поверхность металла, можно управлять этим процессом. В большинстве лазерных технологических комплексов используется CO₂-лазер, но в последнее время все более широкое применение для лазерной резки металлов находят волоконные лазеры, которые характеризуются высокой мощностью излучения, надежностью и низкой стоимостью [1–3]. Характеристики излучения волоконных лазеров позволяют до 3 раз увеличить

скорость резки тонких листов металла по сравнению с CO₂-лазерами той же мощности [2; 3]. С увеличением толщины материала такого превосходства не наблюдается, CO₂-лазер по-прежнему остается непревзойденным по эффективности резки как углеродистых сталей, разрезаемых в струе кислорода, так и нержавеющей стали, а также других металлов, разрезаемых в атмосфере инертных газов. Причины такого превосходства CO₂-лазеров над волоконными лазерами не совсем понятны.

Качество лазерной резки характеризуется величиной шероховатости кромки реза. Сравнения результатов экспериментальных исследований образцов после лазерной резки обоих типов лазеров не дают полного объяснения причин различия в качестве. На рис. 1, 2 показано сравнение шероховатости поверхности для двух типов лазеров, выполненные Институтом сварки (Великобритания) [4] и компанией «Mitsubishi» (Япония) [5]. В диапазоне толщин, показанных

Зайцев А. В., Ковалев О. Б., Смирнова Е. М. Анализ влияния характеристик излучения газового (CO₂) и волоконного лазеров на форму и глубину разрушаемой поверхности металла // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2014. Т. 9, вып. 1. С. 62–69.

Рис. 1. Зависимость величины шероховатости кромки реза от толщины листовой нержавеющей стали при лазерной резке CO₂- и волоконным лазерами (данные Welding Institute, UK [4])

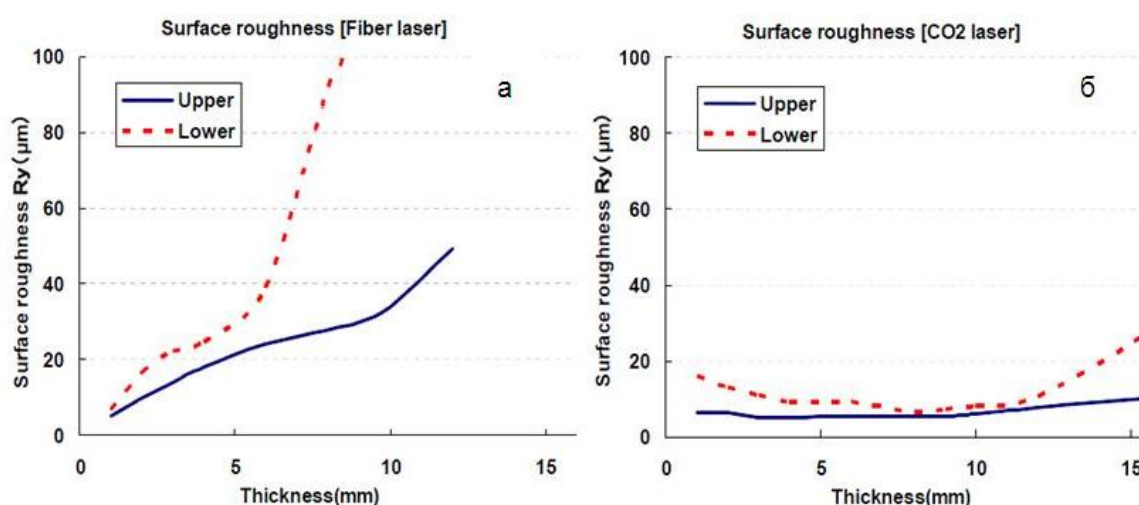
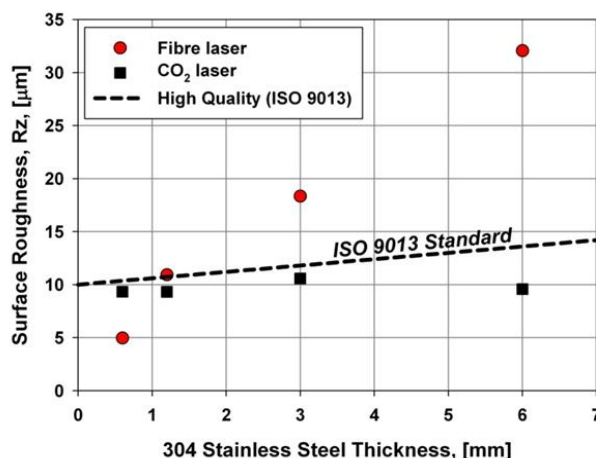


Рис. 2. Влияние толщины материала (нержавеющая сталь) на шероховатость поверхности кромки реза для (а) волоконного лазера и (б) газового CO₂-лазера. Сплошная линия отвечает верхней, а пунктирная нижней части кромки реза (данные Mitsubishi, Japan [5])

на рисунках, величина шероховатости кромки реза остается низкой для CO₂-лазера, однако для волоконного лазера шероховатость кромки реза имеет устойчивый рост по мере роста толщины материала, особенно это заметно в нижней части реза (см. рис. 2).

На интенсивность нагрева и разрушения поверхности большое влияние оказывает поглощательная способность металлов, которая зависит от многих факторов, в том числе от температуры поверхности, длины волны и др.

Достижимое качество лазерной резки нержавеющей стали для волоконных лазеров ограничивается толщиной 6–9 мм. Это хуже, чем качество резки CO₂-лазерами при прочих равных условиях (рис. 3). С практической

точки зрения величина шероховатости кромки реза для листов нержавеющей стали толщиной меньше 4 мм оказывается примерно одинаковой для обоих типов лазеров. Эквивалентное качество реза для CO₂- и волоконного лазеров наблюдается в диапазоне толщин 6–8 мм. Однако при дальнейшем повышении толщины материала качество резки волоконным лазером заметно падает по сравнению с CO₂-лазером (см. рис. 2).

В данной работе на основе физико-математических моделей [6–10] проведено численное исследование влияние длины волны излучения (10,6 мкм для CO₂-лазера и 1,07 мкм для волоконного лазера) на максимальную глубину и форму поверхности разрушаемого материала.

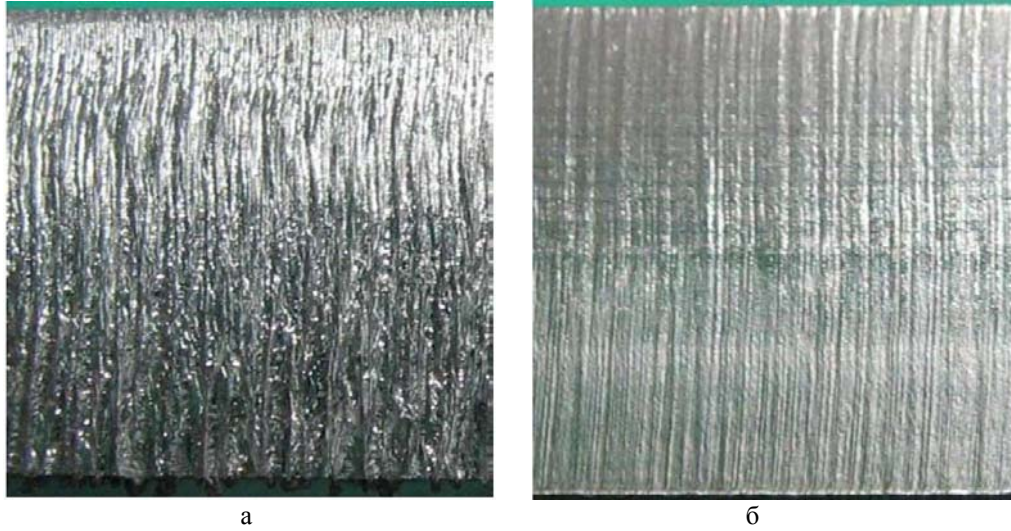


Рис. 3. Волоконные лазеры (а) значительно уступают газовым CO_2 -лазерам (б) по качеству поверхности кромки реза при лазерной резке нержавеющей стали. Толщина материала 9 мм (а, б); скорость резки, м/мин: 0,6 (а), 1,0 (б) (данные Mitsubishi, Japan [5])

Постановка задачи

Проблема моделирования лазерной резки металлов осложнена многообразием взаимосвязанных физических процессов, поэтому детальное их описание в сопряженной трехмерной постановке чрезвычайно затруднено. В известных на эту тему работах для определения оптимальных характеристик излучения обычно используют модель, в которой делается предположение о том, что вся поглощенная лазерная энергия идет на плавление металла, а расплавленный металл почти весь мгновенно удаляется [9–10]. На практике таких условий можно достичь при большой скорости резки и идеальной работе газовой струи. В таком случае математическая модель лазерной резки сводится к решению уравнения кинематической совместности точек разрушаемой поверхности [9]. Следует отметить, что в рамках данных моделей [6–12] не удастся давать какие-либо прогнозы по качеству лазерного реза, определять величину шероховатости его поверхности, которая связана в первую очередь с течением пленки расплава.

Согласно [9; 10], будем считать, что разрушаемую лазером поверхность можно определить как функцию

$$\Phi(x, y, z, t) \equiv z - z_m(x, y, t) = 0,$$

где в начальный момент времени нижнее полупространство ($z \leq 0$) полностью занято

материалом. Изменение поверхности будем наблюдать в системе координат, связанной с лазерным лучом:

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

где V_n – нормальная компонента скорости разрушения поверхности под действием лазерного излучения; V_c – скорость движения луча постоянна и направлена по оси Ox . Скорость движения фронта плавления, а в нашем случае это и есть скорость разрушения материала, записывается в виде

$$V_n(x, y, t) = Q(x, y, t) / G,$$

$$G = \rho_m (c_s (T_m - T_0) + H_m),$$

$$Q(x, y, t) = A(\gamma) \cdot I(x, y, z_m(x, y, t)) \cos \gamma,$$

$$\cos \gamma = 1 / \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_m}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z_m}{\partial y}\right)^2},$$

где $Q(x, y, t)$ – поток поглощенной энергии излучения, G – энергия необходимая для нагрева и плавления единицы объема металла, $A(\gamma)$ – коэффициент поглощения излучения, $I(x, y, z)$ – плотность интенсивности излучения, γ – угол падения излучения.

Рассматривается постоянно действующее излучение лазера, плотность интенсивности которого описывается распределением Гаусса, что соответствует ТЕМ₀₀-моду [13]:

$$I(x, y, z) = \frac{2W}{\pi\omega_z^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_z^2}\right),$$

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

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

Рассматривается круговая поляризация излучения, согласно которой коэффициент поглощения имеет вид

$$A(\gamma) = 1 - 0,5(R_S(\gamma) + R_P(\gamma)),$$

где для расчета коэффициентов отражения используются формулы Френеля [14]:

$$R_S = \frac{\left| \frac{\cos \gamma - N_\omega \cos \gamma_1}{\cos \gamma + N_\omega \cos \gamma_1} \right|^2},$$

$$R_P = \frac{\left| \frac{N_\omega \cos \gamma - \cos \gamma_1}{N_\omega \cos \gamma + \cos \gamma_1} \right|^2},$$

$$\sin \gamma = N_\omega \sin \gamma_1.$$

Здесь R_S , R_P – коэффициенты отражения для поперечной (S) и продольной (P) волн излучения, γ_1 – угол преломления, в общем случае комплексный.

Показатель преломления для металла $N_\omega = n_\omega + ik_\omega$ является комплексным и зависит от длины волны излучения λ . Для нержавеющей стали эти коэффициенты равны $N_\omega(\lambda = 1,07 \text{ мкм}) = 5,46 + 3,96i$ для волоконного лазера, и $N_\omega(\lambda = 10,6 \text{ мкм}) = 15,5 + 15,1i$ для CO₂-лазера [15].

В общем случае коэффициент поглощения зависит от поляризации излучения. Но в реальных технологических процессах применяется в основном круговая поляризация. Это связано со сложностью динамического управления плоскостью поляризации при поворотах режущей головки. Здесь мы будем рассматривать только круговую поляризацию. Зависимость коэффициента поглощения от угла падения для такого излучения представлена на рис. 3. Почти при всех углах падения γ коэффициент поглощения для волоконного лазера значи-

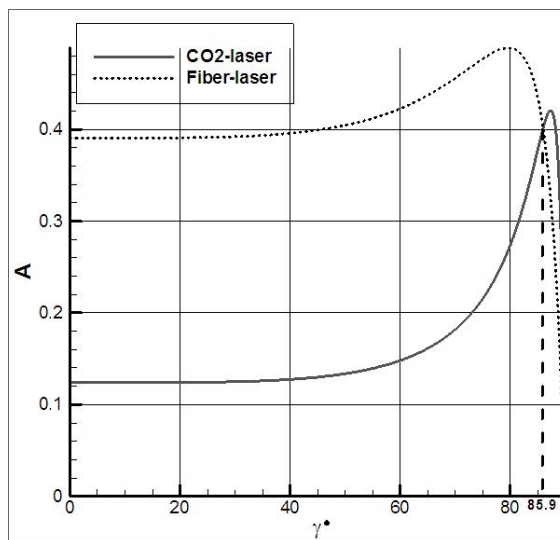


Рис. 4. Зависимости коэффициента поглощения от угла падения для излучения волоконного лазера и CO₂-лазера (нержавеющая сталь, круговая поляризация)

тельно выше, чем для CO₂-лазера. И только на небольшом участке от 86 до 90° имеет место обратное отношение.

Уравнение (1) решается в безразмерном виде, для этого вводятся безразмерные время и координаты ($t' = tV_c/\omega_0$, $x' = x/\omega_0$, $y' = y/\omega_0$, $\beta_m = z_m/\omega_0$):

$$\frac{\partial \beta_m}{\partial t'} - \frac{\partial \beta_m}{\partial x'} = -\sigma A(\gamma) I(x', y', \beta_m), \quad (2)$$

где

$$\cos \gamma = \left(1 + \left(\frac{\partial \beta_m}{\partial x'} \right)^2 + \left(\frac{\partial \beta_m}{\partial y'} \right)^2 \right)^{-1/2},$$

$$\sigma = 2W / \left[\pi \omega_0^2 V_c (\rho_m H_m + \rho_s c_s (T_m - T_0)) \right].$$

Безразмерный параметр σ характеризует отношение удвоенной мощности излучения к энергии, которую необходимо затратить на нагрев металла до температуры плавления, а затем его расплавить.

Результаты расчетов

Уравнение (2) решалось численно по явной разностной схеме с использованием метода установления. Форма разрушаемой поверхности в рамках поставленной задачи описывается от верхней плоскости металлического листа $z = 0$ до предельной глубины разрушения материала $z < 0$. Основная часть излучения, взаимодействуя с металлом,

Физические свойства нержавеющей стали

Физическая величина, размерность	Числовое значение
Температура плавления, К: T_m	1 700
Теплота плавления, кДж/кг: H_m	276
Плотность металла, кг/м ³ : твердого ρ_s / жидкого ρ_m	7 870 / 6 610
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К): твердого c_s / жидкого c_m	0,477 / 0,810
Комплексный коэффициент преломления	
N_ω ($\lambda = 1,07$ мкм)	$5,46 + 3,9i$
N_ω ($\lambda = 10,6$ мкм)	$15,5 + 15,13i$

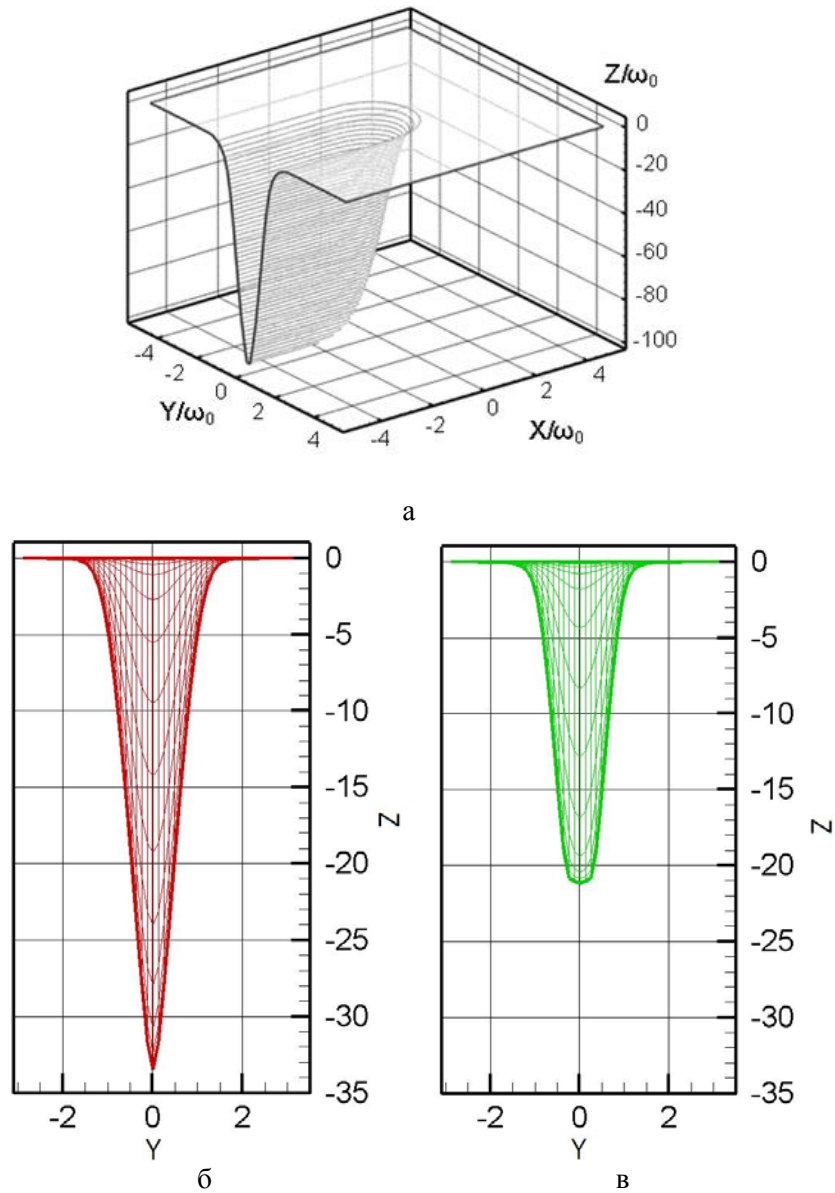


Рис. 5. Трехмерная поверхность лазерного разрушения материала плавлением: а – типичный 3D план поверхности при $\sigma = 300$, CO_2 -лазер. Проекция на плоскость OYZ при $\sigma = 30$: б – волоконный лазер; в – CO_2 -лазер

падает на поверхность реза под большим углом. Главной особенностью при этом является сильная зависимость коэффициента поглощения от угла падения (рис. 4). В расчетах использовались физические параметры нержавеющей стали, табл. 1. Типичная картина формы образующейся поверхности представлена на рис. 5, а. Горизонтальные линии уровня соответствуют контуру получающейся поверхности. В проекции на ось OYZ (рис. 5, б, в), показаны формы поверхностей при $\sigma = 30$. Минимум функции $\beta_m(t', x', y')$ по x', y' при $t' \rightarrow \infty$ соответствует максимальной глубине разрушения материала $H_{\max} = |\min\{\beta_m(t', x', y')\}|$. Если учесть, что $\omega_0 \sim 100$ мкм, то максимально возможная толщина материала будет 3,5 мм для волоконного лазера, и 2,1 мм для CO₂-лазера (см. рис. 5, б, в).

На рис. 6 представлены результаты двух серий вычислительных экспериментов, в которых рассчитывалась величина H_{\max} в широком диапазоне изменения параметра σ для обоих рассматриваемых типов лазеров.

Из полученных результатов следует, что при $\sigma > 65$ максимальная глубина разрушения материала для CO₂-лазера больше, а значит, и эффективность его применения выше.

Таким образом, толщина материала, при которой эффективность обоих лазеров одинакова, соответствует значению порядка 6 мм. Этот факт косвенно согласуется с экспериментальными данными (см. рис. 1, 2). Излучение с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм (по сравнению с $\lambda = 1,07$ мкм) лучше поглощается в нижней части узкого канала реза, проникая в канал со стенками, близкими к вертикальным ($\gamma > 86^\circ$). Это объясняет, почему процесс резки стальных листов большой толщины (от 8 мм и выше) эффективнее производить CO₂-лазером. В случае $\lambda = 10,6$ мкм больше лазерной энергии поглощается в нижней части канала реза. Это способствует еще большему его углублению и является определяющим при выборе типа лазера для резки более толстых материалов.

Излучение с длиной волны $\lambda = 1,07$ мкм лучше поглощается при малых углах падения, что происходит в верхней части поверхности реза. По этой причине лазерная резка тонких листов металлов более эффективна волоконным лазером.

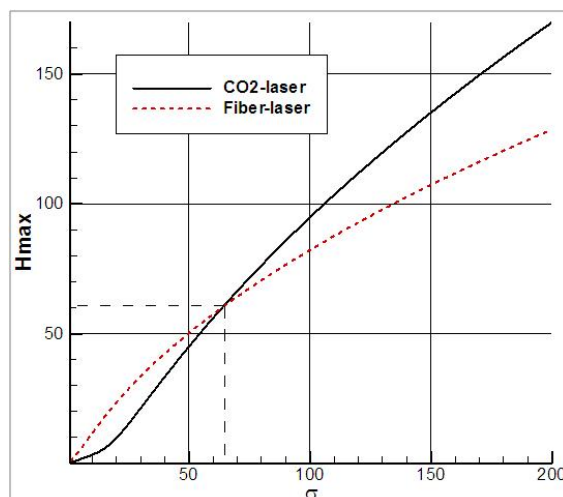


Рис. 6. Зависимость безразмерной глубины разрушения нержавеющей стали от параметра σ для CO₂- и волоконного лазеров с круговой поляризацией

Заключение и выводы

В настоящее время волоконные лазеры имеют явные преимущества перед другими лазерными системами в мощности и качестве излучения, эффективности управления и стоимости. В связи с этим потенциальные возможности этих лазеров, как источников излучения будут все более расширяться, а сами лазеры все больше использоваться при лазерной обработке. Особый интерес здесь представляют исследования возможностей использования волоконных лазеров при резке толстолистовых материалов, где CO₂-лазеры традиционно занимают лидирующие позиции.

На примере численного решения задачи об образовании канала реза при лазерном разрушении поверхности металла [9], проведен сравнительный анализ эффективности использования для этого CO₂- и волоконного лазеров, имеющих круговую поляризацию пучка и различные длины волн излучения: 10,6 и 1,07 мкм соответственно.

Эффективность лазерного разрушения оценивалась на основе расчетных данных о пространственной форме и глубине образовавшегося разреза. К сожалению, рассматриваемые модели [10–12] не позволяют моделировать образование шероховатости и напрямую прогнозировать качество лазерного реза, которому так много уделяется внимания на практике и в экспериментах.

Однако результаты проведенных расчетов максимальной глубины разрушения стальной подложки (см. рис. 6) имеют вполне определенный диапазон максимальной толщины материала, которая на качественном уровне характеризует эффективность использования того или другого типа лазера. Оказалось, что эти данные хорошо коррелируют с данными экспериментов по шероховатости кромки реза (см. рис. 1, 2).

Теоретические оценки эффективного поглощения излучения на фронте лазерного реза говорят о том, что более короткая длина волны волоконных лазеров выгодна прежде всего для резки тонких листов стали, тогда как CO₂-лазер больше подходит для резки толстых материалов. Этот удивительный результат является следствием поведения кривых зависимостей коэффициента поглощения от угла падения излучения (см. рис. 4, где можно видеть существенные количественные различия в коэффициентах поглощения для соответствующих длин волн обоих лазеров как функции угла падения). Особенно это существенно в нижней части реза, где угол падения излучения близок к 90°.

Таким образом, одной из главных причин, определяющих резкое повышение шероховатости реза при использовании волоконного лазера, является недостаточное поглощение энергии лазерного излучения в нижней части реза.

Список литературы

1. *Бертлотти М.* История лазера. Долгопрудный: Интеллект, 2011.
2. *Панченко В. Я., Голубев В. С., Васильцов В. В. и др.* Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / Под ред. В. Я. Панченко. М.: Физматлит, 2009. 664 с.
3. *Steen W. M., Mazumder J.* Laser Material Processing. L.: Springer-Verlag Ltd, 2010.
4. *Powell J., Kaplan A.* A Technical and Commercial Comparison of Fiber Laser and CO₂ Laser Cutting // Laser Institute of America. September 22, 2013. URL: <http://www.lia.org/blog/2013/09/a-technical-and-commercial-comparison-of-fiber-laser-and-co2-laser-cutting>.
5. Fiber Laser vs CO₂ Laser Comparison of Processing Property (Mitsubishi Change for the Better). Oct. 19, 2012. URL: <http://www.ailu.org.uk/assets/document/adverts/Mitsubishi1.pdf>.
6. *Ковалев О. Б., Оришич А. М., Фомин В. М., Шулятьев В. Б.* Сопряженные задачи механики сплошных сред в процессах газолазерной резки металлов // Прикладная механика и техническая физика. 2001. Т. 42, № 6. С. 106–116.
7. *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.
8. *Ковалев О. Б., Зайцев А. В.* Моделирование формы свободной поверхности при лазерной резке металлов. 2. Модель многократного отражения и поглощения излучения // ПМТФ. 2005. Т. 46, № 1. С. 16–20.
9. *Зайцев А. В., Ковалев О. Б., Смирнова Е. М.* Сравнительный анализ характеристик излучения волоконного и CO₂ лазеров на форму и глубину образующейся поверхности металла при лазерной резке // Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине: Сб. докл. IV Всерос. конф. Новосибирск: Нонпарель, 2011. С. 94–97.
10. *Zaitsev A. V., Gurin A. M., Ermolaev G. V.* Numerical Simulation of Cut Kerf Formation under the Influence of CO₂ and Fiber Lasers // 31th International Congress on Applications of Lasers & Electro-optics. Proceedings. Anaheim, CA, USA, 2012. Paper 1902. P. 650–653.
11. *Niziev V. G., Nesterov A. V.* Influence of Beam Polarization on Laser Cutting Efficiency // J. Phys. D: Appl. Phys. 1999. Vol. 32. P. 1455–1461.
12. *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.
13. *Mahrle A., Beyer E.* Theoretical Aspects of Fiber Laser Cutting // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. Vol. 42. P. 175507.
14. *Modest M. F.* Reflectivity and Absorptivity of Opaque Surfaces // LIA Handbook of

Laser Materials Processing / Eds. J F Ready, D. F. Farson. Orlando, FL: Magnolia Publ., 2001. P. 175–81.

15. Яковлев В. И. Классическая электродинамика. Новосибирск, 2009. Ч. 2: Электромагнитные волны.

16. Ораевский А. Н. Гауссовы пучки и оптические резонаторы // Тр. Физ. ин-та им. П. Н. Лебедева. М.: Наука, 1988. Т. 187. С. 3–59.

Материал поступил в редколлегию 14.01.2014

A. V. Zaitsev, O. B. Kovalev, E. M. Smirnova

**THE ANALYSIS OF INFLUENCE OF CHARACTERISTICS OF RADIATION OF CO₂
AND FIBER LASERS ON THE FORM AND DEPTH OF THE DESTROYED SURFACE OF A METAL**

On the basis of model ideas of interaction of laser radiation with metals the results of theoretical and research of influence of radiation wave length with circular polarization of a laser beam on a form of a destroyed surface of stainless steel sheet at a variation of laser power and material thickness are presented. The special attention is paid to the comparative analysis of efficiency of destruction of metal at CO₂ laser (with $\lambda = 10.6\text{мкм}$), and fiber laser (with $\lambda = 1.07\text{мкм}$), which widely now in use in technological complexes on laser cutting of various sheet materials.

Keywords: the laser cutting, metal, radiation absorption, wave length, a cut form, modeling.