

УДК 621.373.826

## ЭНЕРГЕТИКА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОЙ РЕЗКИ СТАЛИ ВОЛОКОННЫМ И СО<sub>2</sub>-ЛАЗЕРАМИ

В. М. Фомин, А. А. Голышев, А. М. Оришич, В. Б. Шулятьев

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,  
630090 Новосибирск, Россия

E-mails: fomin@itam.nsc.ru, alexgol@itam.nsc.ru, laser@itam.nsc.ru, shulyat@rambler.ru

Проведено экспериментальное исследование энергетического баланса лазерной резки листов низкоуглеродистой и нержавеющей стали при минимальной шероховатости поверхности реза. С использованием безразмерных параметров (числа Пекле и поглощенной энергии лазера) обобщены экспериментальные данные в широком диапазоне параметров резки. Впервые установлено, что независимо от вида технологического газа (кислород или азот), типа лазера (волоконный с длиной волны 1,07 мкм или СО<sub>2</sub>-лазер с длиной волны 10,6 мкм) минимальная шероховатость обеспечивается при определенном значении энергии, приходящейся на единицу объема расплава (приблизительно 26 Дж/мм<sup>3</sup>).

Ключевые слова: лазерная резка, СО<sub>2</sub>-лазер, волоконный лазер, безразмерные параметры, энергетический баланс.

DOI: 10.15372/PMTF20170223

**Введение.** В настоящее время для резки металлов наряду с традиционными СО<sub>2</sub>-лазерами (длина волны излучения  $\lambda = 10,6$  мкм) широко применяются волоконные или дисковые лазеры ( $\lambda = 1,07$  мкм). Накоплены экспериментальные данные о лазерной резке различных металлических материалов с использованием в качестве технологического газа как азота, так и кислорода (достаточно подробный обзор работ приведен в [1]). При этом характеристики резов, выполненных лазерами обоих типов, зависят от вида технологического газа и толщины листа разрезаемого материала [2, 3]. В работах [4–6] впервые проведено обобщение экспериментальных данных с использованием безразмерных параметров и критерия минимума шероховатости и найдены оптимальные параметры резки для лазеров указанных типов. Исследован процесс резки листов стали толщиной  $3 \div 16$  мм. Показано, что при резке с кислородом СО<sub>2</sub>-лазер обладает преимуществом по качеству реза, тогда как при использовании химически нейтрального газа (азота) волоконный лазер при сравнимом с СО<sub>2</sub>-лазером качестве обеспечивает существенно большую максимальную скорость резки при одной и той же мощности излучения.

В настоящее время причины различий характеристик резов, выполненных лазерами двух типов, четко не сформулированы. По мнению большинства исследователей, они имеют фундаментальный характер и обусловлены особенностями распространения и поглощения лазерного пучка с длинами волн  $\lambda = 1,07$  мкм и  $\lambda = 10,6$  мкм в канале реза [7]. Однако в известных математических моделях лазерной резки формирование фронта реза и поглощение излучения рассчитываются без учета влияния расплава (см., например, [7]).

В зависимости от параметров пленки расплава и характера течения реальная геометрия волнового фронта может существенно отличаться от рассчитанной в идеализированной постановке [8, 9]. В настоящее время отсутствуют теоретические модели лазерной резки, адекватно описывающие процесс формирования канала реза и устанавливающие связь между энергетическими и механическими характеристиками реза. Поэтому остаются актуальными сравнительные экспериментальные исследования энергетических характеристик реза для лазеров двух типов [1, 9].

В работе [5] проведена оптимизация процесса резки, а в [6] определен энергетический баланс при минимальной шероховатости в случае лазерно-кислородной резки листов низкоуглеродистой стали с использованием  $\text{CO}_2$ -лазера. Насколько известно авторам настоящей работы, сравнение балансов энергии при резке листов из углеродистой стали с использованием кислорода и листов из нержавеющей стали с использованием инертного газа двумя типами лазеров не проводилось. Авторы работы [1] при определении энергетического баланса резки стремились обеспечить одинаковые значения исходных параметров для двух лазеров. Однако параметры, оптимальные для лазера одного типа, необязательно являются оптимальными для лазера другого типа, поэтому результаты таких измерений могут существенно отличаться от результатов, полученных при минимальной шероховатости.

Резка с использованием нейтрального газа существенно отличается от лазерно-кислородной резки: отсутствует дополнительный источник энергии в виде экзотермической реакции окисления. Кроме того, распространение фронта реза происходит по другим механизмам. Поэтому для определения энергетического баланса при лазерной резке с инертным газом и проведения сравнения энергетических характеристик резки с кислородом необходимо выполнить дополнительные исследования.

Целью настоящей работы является экспериментальное определение энергетического баланса при резке волоконным лазером с азотом листов из нержавеющей стали и при резке волоконным и  $\text{CO}_2$ -лазерами с кислородом листов из низкоуглеродистой стали при минимальной шероховатости поверхности реза. Для обобщения экспериментальных данных используются безразмерные параметры.

**Постановка задачи и методика эксперимента.** При лазерной резке происходит локальное плавление материала и удаление расплава струей технологического газа. Как правило, резка листов углеродистой или низколегированной стали большой толщины проводится в струе кислорода (лазерно-кислородная резка). В этом случае экзотермическая реакция окисления железа является дополнительным источником энергии. При резке высоколегированных сталей в качестве технологического газа используется нейтральный газ (азот).

Уравнения баланса мощности в случае резки с кислородом и нейтральным газом можно записать в виде [10]

$$AW + W_{ox} = W_m + W_{cond}; \quad (1)$$

$$AW = W_m + W_{cond}, \quad (2)$$

где  $A$  — интегральный коэффициент поглощения;  $W$  — мощность лазерного излучения;  $W_{ox}$  — мощность, выделяемая при окислении железа;  $W_m$  — мощность, затрачиваемая на плавление металла в зоне реза;  $W_{cond}$  — потери мощности за счет теплопроводности и нагрева металла.

При некоторых видах резки существенным является испарение материала, однако для рассматриваемых в данной работе режимов резки плавлением энергией, затрачиваемой на испарение, можно пренебречь [2]. В развернутом виде уравнение баланса (1) записывается следующим образом:

$$AW + Vbt\rho_mk_{ox} \Delta H = Vbt\rho_m(\tilde{C}_m \Delta T + L_f) + W_{cond}, \quad (3)$$

где  $k_{ox}$  — доля окисленного железа в удаляемом расплаве;  $\rho_m$  — плотность;  $L_f$  — теплота плавления;  $\Delta H$  — удельная теплота реакции окисления, Дж/кг;  $\Delta T = T_m - T_0$ ;  $T_0$  — температура окружающей среды. Следует отметить, что удельная теплоемкость стали  $C_m$  изменяется в процессе нагрева металла до температуры плавления  $T_m$ . Для оценки энергетического баланса лазерного реза в (3) использовано значение теплоемкости  $\tilde{C}_m$  при средней температуре  $T_{cp} = (T_m - T_0)/2$ .

При данной толщине листа  $t$  соотношение компонент в уравнениях баланса (1), (2) зависит от коэффициента поглощения  $A$ , скорости резки  $V$ , ширины реза  $b$  и мощности излучения  $W$ . Резка может выполняться в некотором диапазоне значений скорости и мощности, при этом качество реза при различных значениях  $V$ ,  $b$ ,  $W$  может различаться. Представляет интерес определение энергетического баланса при значениях его компонент, соответствующих наилучшему качеству реза. Как правило, качество характеризуется шероховатостью поверхности реза, которая должна быть близка к минимальной. Шероховатость представляет собой характерную высоту неоднородностей, которая может быть выражена параметром  $R_a$  (среднее арифметическое отклонение профиля) и измерена по стандартной методике. В экспериментах, описываемых в настоящей работе, шероховатость измерялась с помощью лазерного конфокального сканирующего микроскопа Olympus LEXT и профилометра Rank Taylor Hobson серии Form Talysurf. Существующие теоретические модели лазерной резки не позволяют установить связь между энергетическими и механическими характеристиками лазерного реза, поэтому при анализе энергетических зависимостей (1), (2) используются результаты экспериментальных исследований. В работе [6] показано, что при резке с кислородом при условии минимальной шероховатости энергетический вклад лазерного излучения практически совпадал (разброс экспериментальных данных не превышал 15 %) с энергетическим вкладом экзотермической реакции окисления железа:  $AW \simeq W_{ox}$ . В этом случае уравнения баланса (1), (2) с учетом (3) приводятся к следующему виду:

$$2(AW)_{O_2} \simeq (AW)_{N_2} = Vbt\rho_m(\tilde{C}_m \Delta T + L_f) + W_{cond}. \quad (4)$$

Уравнение баланса (4) можно упростить, введя обобщенные безразмерные переменные. В [11, 12] рассчитаны потери энергии за счет теплопроводности в условиях лазерной резки и показано, что выражение для тепловых потерь может быть записано в виде

$$W_{cond} = \tilde{\lambda}_m t \Delta T f(\text{Pe}),$$

где  $f(\text{Pe})$  — безразмерная функция, описывающая потери тепла в зависимости от числа Пекле;  $\text{Pe} = Vb\rho_m\tilde{C}_m/\tilde{\lambda}_m$  — число Пекле, которое можно рассматривать как безразмерную скорость резки;  $\tilde{\lambda}_m$  — теплопроводность. В расчетах [11, 12] зависимость теплофизических параметров  $C_m$ ,  $\lambda_m$  от температуры не учитывалась, а выбирались их значения при некоторой средней температуре  $T_{cp}$ . Введя также безразмерную мощность излучения  $Q = AW/(\tilde{\lambda}_m t T_m)$ , уравнение баланса энергии (4) можно записать в безразмерном виде

$$2Q_{O_2} \simeq Q_{N_2} = \text{Pe} \left( 1 + \frac{L_f}{C_m \Delta T} \right) + f(\text{Pe}). \quad (5)$$

Таким образом, вместо пяти переменных  $A$ ,  $W$ ,  $V$ ,  $t$ ,  $b$  в соотношении (4), которые могут быть легко измерены экспериментально, определен баланс энергии резки (5), зависящий только от двух безразмерных энергетических параметров (мощности  $Q = AW/(\tilde{\lambda}_m t T_m)$  и скорости  $\text{Pe} = Vb/\gamma$ , где  $\gamma = \tilde{\lambda}_m/(\tilde{C}_m\rho_m)$  — температуропроводность, рассчитанная по теплофизическим параметрам при средней температуре  $T_{cp}$ ).

Таблица 1

## Основные характеристики используемых сталей

Тип стали	$\rho_m$ , кг/м <sup>3</sup>	$T_m$ , °С	$L_f$ , кДж/кг	$\tilde{C}_m$ , Дж/(кг·°С)	$\tilde{\lambda}_m$ , Вт/(м·°С)	$\gamma$ , мм <sup>2</sup> /с
Низкоуглеродистая	7860	1500	275	646	30,8	6,1
Нержавеющая	7900	1500	275	580	25,0	5,5

Исследование энергетики и анализ возможности применения безразмерных параметров для обобщения экспериментальных данных в виде зависимости  $Q = f(Re)$  типа (5) проводилось с использованием лазеров двух типов с длинами волн  $\lambda = 10,6$  мкм и  $\lambda = 1,07$  мкм. Применялся иттербиевый лазер IPG/IRE-Polus с мощностью излучения 2 кВт и параметром BPP = 3,8 мм·мрад (BPP (beam parameter product) — произведение радиуса пучка в ближней зоне и углового радиуса пучка в дальней зоне) с коллиматором IPG (модель D5-WC/AC). Диаметр пучка на фокусирующей линзе за коллиматором равен 17 мм, фокусное расстояние линзы — 200 мм. Использовался также CO<sub>2</sub>-лазер мощностью до 8 кВт с самофильтрующим резонатором и BPP = 4,7 мм·мрад. Диаметр пучка на фокусирующей линзе составлял 25 мм при фокусных расстояниях ZnSe-линз, равных 127 и 190 мм. Резка проводилась излучением с круговой поляризацией. Распределение интенсивности излучения в фокальном пятне близко к гауссову. Диаметр фокального пятна оценивался как сумма дифракционного диаметра и диаметра области рассеяния вследствие сферической аберрации. Для волоконного лазера рассчитанный суммарный диаметр равен 180 мкм, для CO<sub>2</sub>-лазера — 160 мкм.

Разрезались листы из низкоуглеродистой стали марки Ст. 20 (табл. 1) толщиной 3, 5, 10 мм при мощности излучения  $W = 0,5 \div 4,0$  кВт. Давление кислорода, используемого в качестве технологического газа, составляло 0,25 МПа. Также выполнялась резка листов из нержавеющей стали марки 12X18H10T (см. табл. 1) толщиной 3, 5, 8 мм при давлении азота 1,3 ÷ 1,6 МПа.

При расчете безразмерных параметров использовались значения теплофизических характеристик металлов при средней температуре 700 °С, осредненные по интервалу [600, 800] °С. Заметим, что в уравнении энергетического баланса (5) зависимость свойств материала от температуры учитывается с помощью безразмерного параметра  $L_f/(\tilde{C}_m \Delta T)$ , значение которого для низкоуглеродистой стали составляло 0,284, для нержавеющей — 0,316. При определении энергетического баланса (5) использовалось среднее значение этого параметра, равное 0,3.

При резке с кислородом для лазеров двух типов при различных значениях мощности находились оптимальные значения скорости и ширины реза, соответствующие минимальной шероховатости. Аналогичные исследования проводились в работе [13]. При резке с азотом определялись оптимальное положение фокуса и диапазон скоростей, соответствующих качественному резу [14].

В настоящей работе коэффициент поглощения лазерного излучения измерялся с помощью методики, подробно описанной в [15]. Под коэффициентом поглощения в данном случае понимается интегральный коэффициент, если учитывается также мощность, поглощенная при многократных отражениях от фронта и стенок канала реза:  $A = (W - W_{tr})/W$ . Здесь  $W$  — мощность лазерного излучения перед фокусирующей линзой;  $W_{tr}$  — мощность излучения, прошедшего через канал реза. Это излучение попадало на приемник — измеритель мощности OPHIR 5000W-CAL-SH. При этом контролировались диаметр луча и его отклонение при взаимодействии излучения с материалом в процессе реза, что обеспечивало попадание на приемник всего излучения, прошедшего через зону реза. Продукты

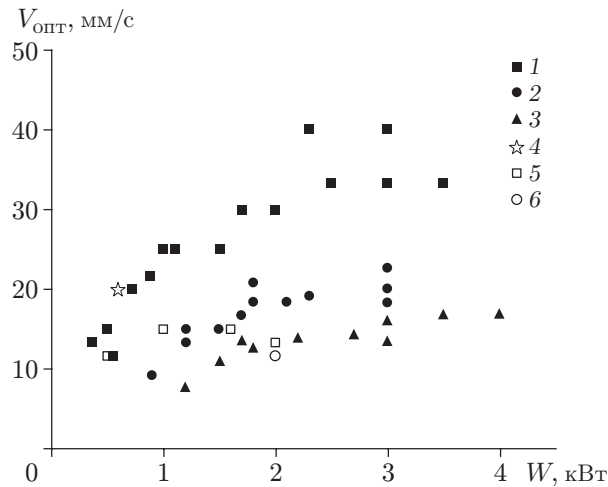


Рис. 1. Зависимость оптимальной скорости резки от мощности излучения  $\text{CO}_2$ -лазера (1–3) и волоконного лазера (4–6):

1 —  $t = 5$  мм, 2 —  $t = 10$  мм, 3 —  $t = 16$  мм, 4 —  $t = 3$  мм, 5 —  $t = 5$  мм, 6 —  $t = 10$  мм

горения металла сдувались струей воздуха, что исключало их попадание на приемник. В расчетах число Пекле принималось равным среднему значению его значений на верхней и нижней поверхностях листа.

**Результаты экспериментов и их обсуждение.** В работе [13] показано, что при резке листов из низкоуглеродистой стали волоконным и  $\text{CO}_2$ -лазерами с использованием кислорода в качестве технологического газа для каждого значения мощности излучения лазера существуют оптимальные скорость  $V_{\text{опт}}$  и ширина реза  $b_{\text{опт}}$ , соответствующие минимальной шероховатости. С помощью методики, подробно описанной в работе [4], найдены значения  $V_{\text{опт}}$  и  $b_{\text{опт}}$  при резке  $\text{CO}_2$ -лазером листов стали толщиной  $t = 5, 10, 16$  мм с мощностью излучения  $W = 0,5 \div 4,0$  кВт и при резке волоконным лазером листов стали толщиной  $t = 3, 5, 10$  мм с мощностью излучения  $W = 0,5 \div 2,0$  кВт. Некоторые результаты этих исследований представлены в виде зависимостей оптимальной скорости  $V_{\text{опт}}$  (рис. 1) и оптимальной ширины реза  $b_{\text{опт}}$  (рис. 2) от мощности излучения лазера. Следует отметить, что каждая точка на рис. 1, 2 получена при одновременной оптимизации скорости резки и ширины реза. В пространстве технологических параметров  $V_{\text{опт}} - W$  на рис. 1 экспериментальные точки находятся в достаточно большой области оптимальных значений. Это обусловлено тем, что оптимальная скорость резки и ширина реза зависят не только от мощности, но и от типа лазера и толщины разрезаемого листа. Это существенно затрудняет получение обобщенных энергетических зависимостей.

На рис. 3 приведена зависимость коэффициента поглощения от скорости резки при различных значениях мощности излучения волоконного и  $\text{CO}_2$ -лазеров. Для каждого значения мощности измерения проводились при скоростях, близких к оптимальной, соответствующей минимальной шероховатости (табл. 2). При значениях мощности лазеров  $W = 1, 2$  кВт зависимости коэффициента поглощения излучения волоконного и  $\text{CO}_2$ -лазеров от скорости совпадают, но оптимальные значения скорости резки этими лазерами существенно различаются (см. табл. 2).

При резке с химически нейтральным газом для всех значений мощности и толщины листа оптимизация по минимуму шероховатости проводилась путем изменения положения фокуса излучения лазера относительно поверхности разрезаемого металла. На рис. 4 приведена зависимость шероховатости от скорости при мощности излучения  $W = 2$  кВт и  $t = 3, 5$  мм. Видно, что в пределах погрешности экспериментальных данных шерохо-

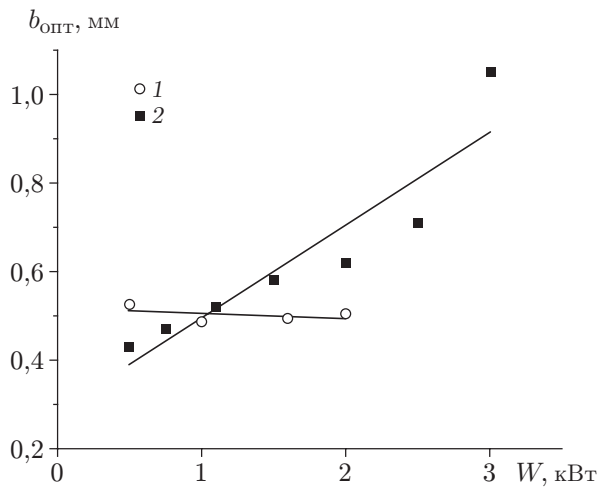


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость оптимальной ширины реза от мощности излучения волоконного лазера (1) и  $\text{CO}_2$ -лазера (2)

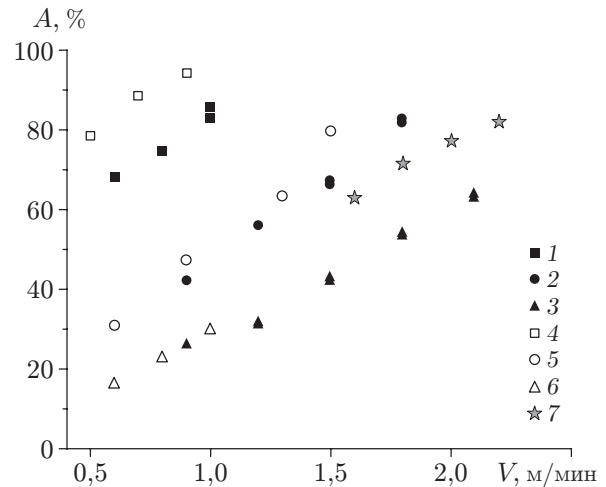


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость коэффициента поглощения от скорости резки листов низкоуглеродистой стали  $\text{CO}_2$ -лазером (1–3) и волоконным лазером (4–6), а также листов нержавеющей стали волоконным лазером (7):

1, 4 —  $W = 0,5$  кВт, 2, 5 —  $W = 1$  кВт, 3, 6, 7 —  $W = 2$  кВт

Таблица 2

Оптимальная скорость  $V_{\text{опт}}$  при резке листов из низкоуглеродистой стали толщиной  $t = 5$  мм

Тип лазера	$V_{\text{опт}}$ , м/мин			
	$W = 500$ Вт	$W = 1000$ Вт	$W = 1600$ Вт	$W = 2000$ Вт
$\text{CO}_2$ -лазер	0,9	1,5	1,8	1,8
Волоконный лазер	0,7	0,9	0,9	0,8

ватость практически не зависит от скорости резки. Таким образом, в отличие от способа лазерно-кислородной резки, при котором для каждого значения мощности и толщины листа существуют оптимальные скорость и ширина реза, при резке с использованием нейтрального технологического газа качественный рез можно получить в широком диапазоне скоростей.

На рис. 5 представлена зависимость безразмерной скорости  $Re_{\text{опт}} = V_{\text{опт}} b_{\text{опт}} / \gamma$  от безразмерной мощности  $Q_{\text{опт}} = A_{\text{опт}} W / (\tilde{\lambda}_m t T_m)$  при резке с использованием азота. Значение коэффициента поглощения  $A_{\text{опт}}$  выбиралось при данной мощности и оптимальной скорости, соответствующей минимальной шероховатости. Использованы результаты резки листов из нержавеющей стали толщиной  $t = 3, 5$  мм волоконным лазером при мощности  $W = 0,5; 1,0; 2,0$  кВт.

На рис. 5 приведены также результаты экспериментов, полученные при резке листов из низкоуглеродистой стали с минимальной шероховатостью поверхности лазерами с длинами волн  $\lambda = 1,07$  мкм и  $\lambda = 10,6$  мкм при использовании кислорода в качестве технологического газа. С целью сравнения затрат энергии при качественной резке с использованием кислорода и нейтрального газа вклад экзотермической реакции окисления железа учтен в соответствии с (5) за счет увеличения поглощенной энергии излучения в два раза.

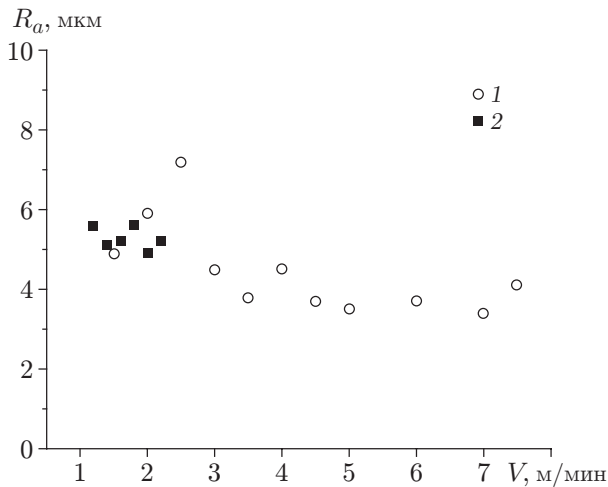


Рис. 4

Рис. 4. Зависимость шероховатости поверхности от скорости резки листов нержавеющей стали различной толщины волоконным лазером:

1 —  $t = 3$  мм, 2 —  $t = 5$  мм

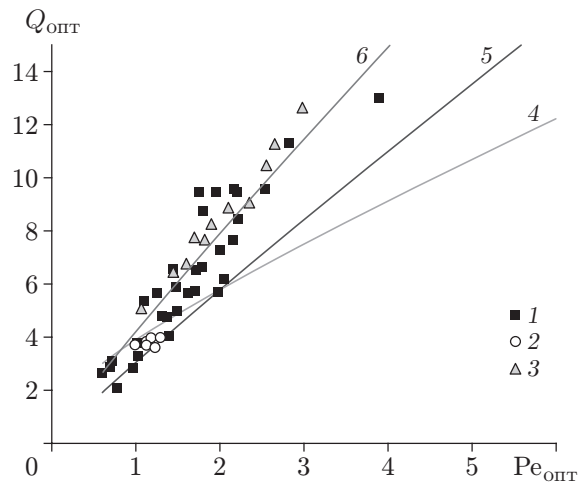


Рис. 5

Рис. 5. Зависимость оптимального числа Пекле от оптимальной безразмерной мощности:

1, 2 — при резке листов низкоуглеродистой стали (1 —  $\text{CO}_2$ -лазер, 2 — волоконный лазер), 3 — при резке листов нержавеющей стали волоконным лазером, 4 — расчет по формуле (9), 5 — расчет по формуле (8), 6 — расчет по формуле (10)

Из рис. 5 следует, что во всем диапазоне толщин листов и значений мощности излучения экспериментальные данные для лазеров двух типов описываются одной зависимостью  $Q_{\text{опт}} \sim \text{Pe}_{\text{опт}}$ . Отклонение экспериментальных значений от средних значений не превышает  $15 \div 20$  %.

Следует отметить, что при резке волоконным лазером с использованием кислорода все экспериментальные данные находятся в окрестности точки  $\text{Pe}_{\text{опт}} = \text{const}$ ,  $Q_{\text{опт}} = \text{const}$ , расположенной на единой зависимости  $\text{Pe}_{\text{опт}}(Q_{\text{опт}})$ .

Данные, приведенные на рис. 5, позволяют оценить величину поглощенной энергии, приходящейся на единицу объема удаляемого из зоны реза материала. Тангенс угла наклона графика зависимости  $Q_{\text{опт}} \sim \text{Pe}_{\text{опт}}$ , близкой к линейной, равен

$$\frac{Q_{\text{опт}}}{\text{Pe}_{\text{опт}}} = \frac{A_{\text{опт}}W/(\lambda_m t T_m)}{V_{\text{опт}} b_{\text{опт}}/\gamma} = \frac{A_{\text{опт}}W}{(Vt b)_{\text{опт}}} \frac{\gamma}{\lambda_m T_m} \approx 3,7.$$

Поэтому при постоянных технологических параметрах разрезаемого материала ( $\gamma/(\lambda T_m) = 1/(\tilde{C}_m \rho_m T_m) = 0,13 \text{ мм}^3/\text{Дж}$ ) условие качественной резки имеет вид

$$\frac{A_{\text{опт}}W}{(Vt b)_{\text{опт}}} \approx 3,7 \tilde{C}_m \rho_m T_m.$$

Используя данные табл. 1 для низкоуглеродистой и нержавеющей стали, получаем значения величины  $\tilde{C}_m \rho_m T_m$ , равные 7,6 и 6,4 Дж/мм<sup>3</sup> соответственно. Таким образом, в пределах погрешности экспериментальных данных получено одно и то же среднее значение поглощенной энергии  $Q_{\text{опт}} \approx 26 \text{ Дж/мм}^3$ , приходящееся на единицу удаляемого из канала реза материала. При резке с использованием нейтрального газа эта энергия является энергией излучения лазера, а при использовании кислорода 50 % этой энергии являет-

ся энергией излучения лазера и 50 % — энергией, выделяющейся при экзотермической реакции окисления железа.

Проведем сравнение полученной экспериментально зависимости  $Q_{\text{опт}} \sim \text{Pe}_{\text{опт}}$  с зависимостью  $Q(\text{Pe})$  из уравнения баланса энергии (5), используя результаты численного моделирования потерь тепла в зоне реза за счет теплопроводности. Согласно модели, предложенной в работе [12], для оценки потерь тепла можно использовать выражение

$$Q_{\text{cond}} = f(\text{Pe}) = W_{\text{cond}}/(\tilde{\lambda}_m t \Delta T) = 3,2(\text{Pe}/2)^{0,868}. \quad (6)$$

В работе [11] получена другая зависимость тепловых потерь от числа Пекле:

$$Q_{\text{cond}} = f(\text{Pe}) = W_{\text{cond}}/(\tilde{\lambda}_m t \Delta T) = 3,2(\text{Pe}/2)^{0,3}. \quad (7)$$

Подставляя выражения (6), (7) в (5), получаем

$$2Q_{\text{O}_2} \simeq Q_{\text{N}_2} = 1,3 \text{Pe} + 3,2(\text{Pe}/2)^{0,868}; \quad (8)$$

$$2Q_{\text{O}_2} \simeq Q_{\text{N}_2} = 1,3 \text{Pe} + 3,2(\text{Pe}/2)^{0,3}. \quad (9)$$

В отличие от [11, 12] в данной работе число Пекле в выражениях (6), (7) рассчитывалось с учетом диаметра канала. На рис. 5 сплошными линиями показаны результаты расчета по формулам (8), (9). Видно, что, поскольку зависимость безразмерной энергии  $Q_{\text{cond}}$  от числа Пекле  $\text{Pe}$  близка к линейной, зависимость  $Q_{\text{опт}} \sim \text{Pe}_{\text{опт}}$ , полученная с использованием выражения (6), качественно согласуется с экспериментальной зависимостью. Для того чтобы получить не только качественное, но и количественное соответствие экспериментальных данных и результатов численных расчетов, в соотношение (8) был введен дополнительный параметр  $\alpha$ :

$$2Q_{\text{O}_2} \simeq Q_{\text{N}_2} = \text{Pe}(1 + L_f/(\tilde{C}_m \Delta T)) + 3,2\alpha(\text{Pe}/2)^{0,868}.$$

Количественное соответствие этих зависимостей имеет место при  $\alpha = 1,66$ .

**Заключение.** В работе проведено экспериментальное исследование энергетического баланса при резке волоконным лазером с использованием азота листов нержавеющей стали, а также при резке волоконным и  $\text{CO}_2$ -лазерами с использованием кислорода листов низкоуглеродистой стали. Показано, что использование двух безразмерных энергетических параметров (мощности  $Q$  и числа Пекле  $\text{Pe}$ ) позволяет представить экспериментальные данные в виде единой зависимости  $Q_{\text{опт}} \sim \text{Pe}_{\text{опт}}$ , близкой к линейной. Определено энергетическое условие качественной резки  $A_{\text{опт}} W/(Vtb)_{\text{опт}} \approx \text{const}$ . Таким образом, установлено, что независимо от длины волны излучения (типа лазера) и вида технологического газа (кислород или азот) величина энергии, приходящейся на единицу объема расплава, составляет приблизительно 26 Дж/мм<sup>3</sup>. При использовании кислорода 50 % этой энергии является энергией излучения лазера и 50 % — энергией, выделяющейся при экзотермической реакции окисления железа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Scintilla L. D., Tricarico L., Wetzig A., Beyer E.** Investigation on disk and  $\text{CO}_2$  laser beam fusion cutting differences based on power balance equation // Intern. J. Machine Tools Manufacture. 2013. V. 69. P. 30–37.
2. **Powell J., Petring D., Kumar R. V., et al.** Laser-oxygen cutting of mild steel: the thermodynamics of the oxidation reaction // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. 015504.
3. **Himmer T., Pinder T., Morgenthal L., Beyer E.** High brightness lasers in cutting applications // Proc. of the 27th Intern. congress on applications of lasers and electro-optics, Orlando (USA), Oct. 29 — Nov. 1, 2007. S. 1., 2007. P. 87–91.



4. **Фомин В. М., Гольшев А. А., Маликов А. Г. и др.** Механические характеристики высококачественной лазерной резки стали волоконным и CO<sub>2</sub>-лазерами // ПМТФ. 2015. Т. 56, № 4. С. 215–225.
5. **Маликов А. Г., Оришич А. М., Шулятьев В. Б.** Экспериментальная оптимизация газолазерной резки толстых стальных листов // Квантовая электрон. 2009. Т. 39, № 6. С. 547–551.
6. **Маликов А. Г., Оришич А. М., Шулятьев В. Б.** Энергетические характеристики лазерно-кислородной резки стали излучением CO<sub>2</sub>-лазера // Квантовая электрон. 2012. Т. 42, № 7. С. 640–644.
7. **Mahrle A., Beyer E.** Theoretical aspects of fiber laser cutting // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. 175507.
8. **Scintilla L. D., Tricarico L., Mahrle A., et al.** A comparative study on fusion cutting with disk and CO<sub>2</sub> lasers // Proc. of the 29th Intern. congress on applications of lasers and electro-optics, Anaheim (USA), Sept. 26–30, 2010. S. 1., 2010. P. 249–258.
9. **Hirano K., Fabbro R.** Possible explanations for different surface quality in laser cutting with 1 and 10  $\mu\text{m}$  beams // J. Laser Applicat. 2012. V. 24. 012006.
10. **Ready J. F.** Handbook of laser material processing. Orlando: LIA Magnolia Publ. Inc., 2001.
11. **Schulz W., Becker D., Franke J., et al.** Heat conduction losses in laser cutting of metals // J. Phys. D: Appl. Phys. 1993. V. 26. P. 1357–1363.
12. **Prusa J. M., Venkitachalam G., Molian P. A.** Estimation of heat conduction losses in laser cutting // Intern. J. Machine Tools Manufacture. 1999. V. 39. P. 431–458.
13. **Гольшев А. А., Маликов А. Г., Оришич А. М., Шулятьев В. Б.** Экспериментальное сравнение затрат лазерной энергии при качественной лазерно-кислородной резке низкоуглеродистой стали излучениями волоконного и CO<sub>2</sub>-лазеров // Квантовая электрон. 2015. Т. 45, № 9. С. 873–878.
14. **Гольшев А. А., Маликов А. Г., Оришич А. М., Шулятьев В. Б.** Высококачественная лазерная резка нержавеющей стали в атмосфере инертного газа с помощью волоконного иттербиевого и CO<sub>2</sub>-лазеров // Квантовая электрон. 2014. Т. 44, № 3. С. 233–238.
15. **Miyamoto I., Mauro H.** Mechanism of laser cutting // Welding World. 1991. V. 29. P. 283–294.

*Поступила в редакцию 28/III 2016 г.*

---