

УДК 621.373.826

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ГАЗОЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ ТОЛСТЫХ СТАЛЬНЫХ ЛИСТОВ

В. М. Фомин, А. Г. Маликов, А. М. Оришич, В. Б. Шулятьев

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск
E-mail: laser@itam.nsc.ru

Представлены результаты экспериментального определения энергетического баланса в процессе лазерно-кислородной резки листов толщиной $5 \div 16$ мм с помощью CO_2 -лазера в режиме качественного реза с минимальной степенью шероховатости поверхности. В качестве вспомогательного газа использовался кислород. Установлено, что входящие в уравнение энергетического баланса энергетические потоки мощности для листов толщиной 5, 10 и 16 мм, отнесенные к единице толщины листа, не зависят от нее и имеют близкие значения.

Ключевые слова: лазерная резка, критерий качества реза, энергетический баланс, потоки энергии.

Введение. Несмотря на большое количество исследований лазерной резки, полного описания этого процесса еще не существует [1–4]. Прежде всего это обусловлено многообразием и сложным взаимодействием происходящих при лазерной резке физических процессов, главными из которых являются распространение излучения в канале реза, поглощение излучения, выделение энергии в результате экзотермической реакции и образование окислов металла при использовании кислорода в качестве вспомогательного газа, распространение тепла в материале и образование расплава, течение газа в канале реза, движение пленки расплава под действием потока газа.

Накоплена достаточно обширная база данных по лазерной резке, главным образом для листов толщиной менее 10 мм [1, 5, 6]. Современные технологические CO_2 -лазеры позволяют качественно разрезать листы толщиной до 30 мм [1]. Повышение мощности излучения как одно из основных направлений развития лазеров для резки позволяет увеличивать скорость резки и толщину разрезаемых листов [7]. Необходимое для выявления общих закономерностей корректное сопоставление данных из разных источников не всегда возможно, так как экспериментальные исследования проводятся в разных условиях или их опубликованные результаты содержат неполные наборы данных.

В работах по теоретическому моделированию процесса газолазерной резки зависимость между мощностью лазерного излучения и скоростью резки определяется на основе уравнения баланса энергии [8, 9]. Такой подход позволяет найти максимальную скорость, не обязательно являющуюся оптимальной с точки зрения качества реза [5]. Кроме того, ряд важных параметров, входящих в уравнение баланса энергии, например коэффициент поглощения излучения в канале реза и величина энергии экзотермической реакции окисления железа, зависят от условий резки и не всегда могут быть определены с требуемой точностью, особенно при резке листов толщиной $5 \div 25$ мм. Это затрудняет надежное теоретическое определение вклада различных процессов в полный энергетический баланс лазерной резки при использовании кислорода в качестве технического газа.

Важнейшей характеристикой лазерной резки металлов является ее качество. Показателями качества реза являются величина грата (застывших капель расплава на нижней кромке реза), степень шероховатости поверхности реза, ширина зоны термического влияния, прямизна стенок реза.

Количественный критерий качества реза сформулирован в работах [10, 11], в которых впервые проведена комплексная оптимизация в широком диапазоне значений параметров резки стали излучением CO₂-лазера по критерию минимума шероховатости поверхности в отсутствие грата, найдены безразмерные параметры и критериальные зависимости, определяющие минимальную степень шероховатости стенок реза.

Установлено, что минимальная степень шероховатости поверхности достигается в том случае, если во всем диапазоне толщин остаются постоянными величина лазерной энергии, приходящейся на единицу объема удаляемого материала, $18 \div 20$ Дж/мм³ и мощность на единицу толщины листа $W_r/t \simeq 200$ Вт/мм, которым соответствует постоянное значение числа Пекле $Pe = V_c b / \gamma_m \simeq 0,6 \div 0,7$. В безразмерном виде эти условия записываются следующим образом:

$$\frac{W_r}{V_c t b \rho_m E_m} \simeq \text{const}, \quad \frac{W_r}{k_m t \Delta T} \simeq \text{const}.$$

Здесь t — толщина листа металла; W_r — мощность излучения; V_c — скорость резки; b — ширина реза; λ_m — теплота плавления металла; ρ_m — плотность; C_m — теплоемкость; k_m — теплопроводность; $E_m = C_m \Delta T + \lambda_m$ — энергия, затрачиваемая на плавление металла; $\gamma_m = k_m / (\rho_m C_m)$; $\Delta T = T_m - T_{m0}$ — изменение температуры металла в процессе резки; $T_{m0} = 300$ К — начальная температура стального листа; T_m — температура жидкого металла в зоне реза. Найдена зависимость ширины реза от толщины разрезаемого листа.

Дальнейшее развитие исследований в данном направлении позволило изучить энергетические закономерности. Важной характеристикой лазерной резки является ее энергетическая эффективность, для определения которой необходимо знать энергетический баланс лазерной резки. В зоне реза наряду с лазерной энергией выделяется энергия, возникающая в результате экзотермической реакции окисления железа. Наиболее значительные потери энергии в зоне реза обусловлены нагревом образца.

В настоящей работе экспериментально определен энергетический баланс лазерно-кислородной резки стали при значениях параметров, выбранных в соответствии с полученными в работах [10, 11] критериальными зависимостями оптимальных условий резки толстых стальных листов.

1. Постановка экспериментов. Схема и основные элементы лазерной резки листа из стали показаны на рис. 1. Лазерное излучение мощностью W_r фокусируется на лист металла. Поглощенное излучение, а также выделение энергии экзотермической реакции окисления металла (в случае резки с кислородом) приводят к разогреву металла до температуры плавления. На боковой поверхности листа образуется тонкая пленка расплава. Под действием кислорода, который подается через газодинамическое сопло, расплав движется на фронте реза в виде тонкой пленки или разрушается газовым потоком на капли и выносится из области реза. Лазерный луч передвигается, образуя узкий рез.

Уравнение баланса энергии лазерной резки стали с кислородом можно записать в виде [5, 6, 9]

$$A W_r + P_{\text{Fe}} = P_m + P_{\text{cond}} + P_v, \quad (1)$$

где A — интегральный коэффициент поглощения; W_r — мощность лазерного излучения; P_{Fe} — мощность экзотермической реакции окисления железа; P_m — мощность, затрачиваемая на плавление металла в зоне реза; P_{cond} — мощность, теряемая в зоне реза за счет

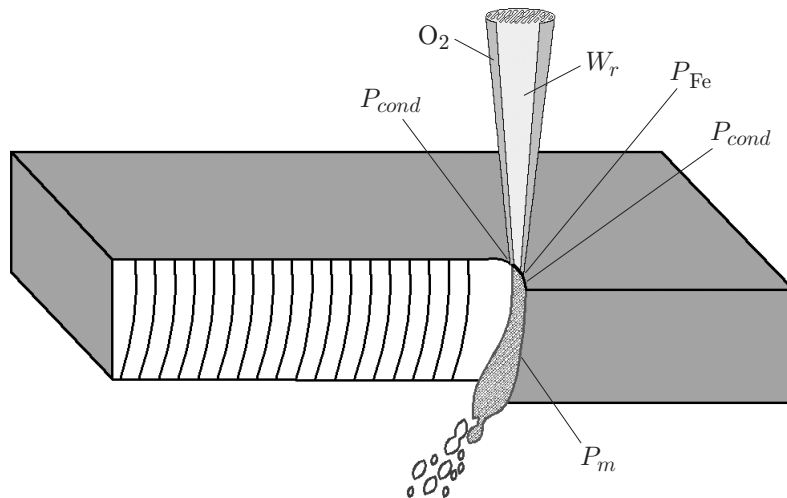


Рис. 1. Схема процесса лазерной резки:

W_r — лазерная мощность; P_{Fe} — мощность реакции окисления железа; P_{cond} — мощность тепловых потерь; P_m — мощность, затрачиваемая на плавление материала

нагрева металла. При лазерной резке металл удаляется в жидкой фазе, поэтому затраты энергии на испарение P_v в (1), как правило, не учитываются [4].

В выражении для баланса энергетических потоков (1) обычно контролируется только величина W_r . Для определения остальных величин требуются специальные измерения и расчеты.

Величина P_{Fe} может быть определена из выражения [4, 8]

$$P_{Fe} = \eta t b V_c \rho_m E_{O_2} / M_{Fe}, \quad (2)$$

где $\rho_m = 7,8 \cdot 10^{-3}$ г/мм³ — плотность разрезаемого металла (железа); $E_{O_2} = 254$ кДж/моль — энергия реакции



$M_{Fe} = 55,8$ г/моль — молярная масса железа [4, 8]; η — доля железа, окислившегося в процессе удаления расплава из щели реза.

Величина η существенно зависит от условий эксперимента. Принимаемое иногда значение $\eta = 0,5$ [4, 8] не является универсальным и требует экспериментальной проверки. Непосредственное измерение этого параметра затруднено, так как степень окисления продуктов лазерной резки изменяется в процессе перемещения капель расплава от зоны резки до места их сбора [4].

С учетом данного обстоятельства в экспериментах проводились измерения величин A , W_r , P_m , P_{cond} . На основе полученных данных значение P_{Fe} находилось из выражения (1), а значения η — из (2).

В экспериментах использовался непрерывный CO₂-лазер с самофильтрующим резонатором и параметром ВРР = 4,7 мм·мрад (ВРР — beam parameter product) [7]. Резка проводилась традиционным способом — с помощью линзовой фокусирующей системы, соосно с лучом подавался кислород с концентрацией 99,999 %. Разрезались листы толщиной 5, 10, 16 мм.

Для листов разной толщины параметры резки выбирались в соответствии с установленными критериями получения минимальной степени шероховатости поверхности реза, и значения W_r/t и числа Пекле были приближенно равны [10, 11].

Таблица 1

Параметры резки

t , мм	W_r , Вт	V_c , мм/с	b , мм	ΔP , атм	Re
5	1000	24,17	0,530	0,50	0,66
10	2000	18,33	0,725	0,50	0,66
16	3000	15,00	0,958	0,35	0,71

Таблица 2

Результаты измерений P_{cond} при различной толщине образцов

t , мм	M , г	L , см	τ , с	P_{cond} , Вт	ΔT , °С
5	186,9	10,4	4,2	873	21,2
5	90,6	10,0	4,0	778	37,4
10	95,8	9,5	5,2	1533	90,2
10	349,8	9,5	5,2	1749	28,0
16	243,3	9,0	6,0	2697	72,3
16	629,8	8,9	6,0	2937	30,2

В табл. 1 приведены значения величин W_r , V_c , b , ΔP , полученные экспериментально при различной толщине листа t , а также значения числа Пекле для проведенных экспериментов.

Величину P_m можно определить из выражения

$$P_m = tbV_c\rho_m(C_m \Delta T + \lambda), \quad (4)$$

где $C_m = 0,66$ Дж/(г·К) — средняя удельная теплоемкость металла в процессе резки; $\lambda = 275$ Дж/г — теплота плавления [4, 8]. Согласно [4] в случае небольших скоростей значение T_m может составлять приблизительно 1900 К. В результате подстановки в (4) значений скорости резки и ширины реза для листов различной толщины из табл. 1 определялась мощность, необходимая для плавления металла.

Для определения потерь мощности за счет теплопроводности P_{cond} применялся калориметрический метод: от стальной пластины толщиной t отрезался образец длиной L в течение времени τ , после чего находились значения энергии W_g (с помощью калориметра) и мощности P_{cond} (из соотношения $P_{cond} = 2W_gV_c/L = 2W_g/\tau$), затрачиваемых на нагрев материала в процессе реза. Множитель 2 в соотношении для P_{cond} означает, что в отрезанном образце содержится только половина энергии, теряемой вследствие теплопроводности.

В работе [12] проведен детальный анализ точности данного метода измерения энергии, затрачиваемой на нагрев отрезаемого металла. Показано, что потери энергии за счет конвективного охлаждения как технологическим газом, так и окружающим воздухом малы при условии нагрева образцов до температуры не более 100 °С.

Для контроля возможных потерь тепла для восьми образцов различной массы проводились измерения среднего значения мощности P_{cond} , теряемой в зоне реза за счет нагрева металла. Условия опытов и результаты данных измерений P_{cond} для максимально различающихся масс образцов M толщиной 5, 10 и 16 мм представлены в табл. 2.

При расчете W_g использовалось значение удельной теплоемкости $C_m = 0,46$ Дж/(г/К) для холодного металла.

Согласно работе [12] влияние конвективного охлаждения на результаты измерений существенно зависит от средней температуры образцов. Однако из приведенных в табл. 2 данных следует, что изменение ΔT в 2–3 раза при постоянной толщине t разрезаемого стального листа оказывает слабое влияние на значения P_{cond} . Это позволяет предпо-

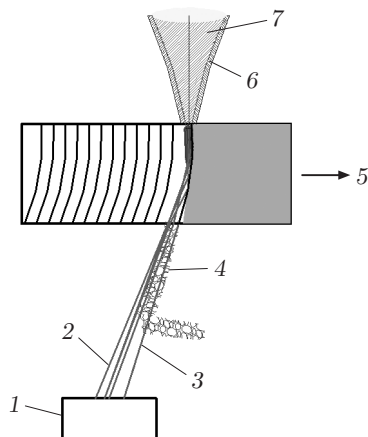


Рис. 2

Рис. 2. Схема экспериментальной установки для измерения коэффициента поглощения:

1 — приемник, 2 — струя воздуха, 3 — прошедшее излучение, 4 — продукты резки, 5 — направление резки, 6 — струя кислорода, 7 — лазерное излучение

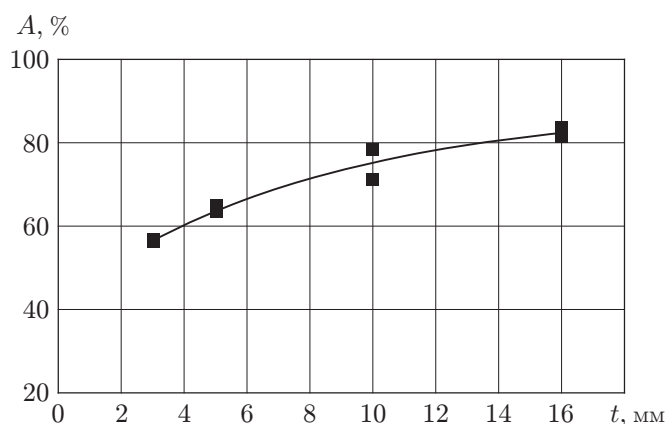


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость коэффициента поглощения от толщины материала при условии качественного реза:

точки — экспериментальные значения, линия — аппроксимация [13]

жить, что конвективное охлаждение незначительно влияет на измеряемую величину P_{cond} . Разброс экспериментальных значений P_{cond} для восьми образцов не превышал $\pm 6\%$.

В работе [13] разработана методика и проведено измерение коэффициента поглощения излучения A при лазерной резке листов стали толщиной $t = 3$ мм. Получено значение $A \approx 0,56 \div 0,70$. Для листов большой толщины измерения поглощения не проводились.

В настоящей работе коэффициенты поглощения лазерного излучения для стальных листов толщиной 5, 10 и 16 мм измерялись с помощью методики, подробно описанной в [13]. Схема экспериментальной установки показана на рис. 2.

Суть данной методики состоит в следующем. Прошедшее через металл 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 обуславливало попадание на приемник всего излучения, прошедшего зону реза. Продукты горения металла сдувались струей воздуха, что исключало их попадание на приемник. На рис. 3 представлены результаты измерений коэффициента поглощения и приведены данные работы [13]. Точками показаны экспериментальные значения, линия является аппроксимацией. Видно, что значения коэффициента поглощения хорошо согласуются с данными [13] и возрастают при увеличении толщины разрезаемого материала.

2. Результаты экспериментов и их обсуждение. В табл. 3 приведены обобщенные данные об основных потоках энергии при лазерной резке с кислородом листов стали толщиной 5, 10, 16 мм. При проведении измерений использовались режимы резки, соответствующие критерию минимума шероховатости.

С использованием измеренных значений P_{Fe} и выражения (2) для условий проведенного эксперимента определен параметр η — доля железа, окислившегося в процессе удаления расплава из щели реза. Результаты расчета приведены в табл. 4 ($d\Omega_{Fe}/d\tau = tbV_c$, $dM_{Fe}/d\tau$ — объемный и массовый расходы металла при лазерной резке соответственно,

Таблица 3

Значения потоков энергии

t , мм	W_r , Вт	AW_r , Вт	P_{Fe} , Вт	P_m , Вт	P_{cond} , Вт
5	1000	650	833	664	819,9
10	2000	1500	1478	1370	1608,0
16	3000	2490	2724	2377	2837,0

Таблица 4

Значения расходов

t , мм	$d\Omega_{Fe}/d\tau$, мм ³ /с	$dM_{Fe}/d\tau$, г/с	P_{Fe}^{all} , Вт	η , %	$dM_{O_2}/d\tau$, г/с	$d(M_{gas})_{O_2}/d\tau$, г/с
5	64,0	0,500	2304	36	0,051	0,07
10	132,7	1,035	4777	30	0,088	0,13
16	229,9	1,790	8276	33	0,168	0,23

$P_{Fe}^{all} = tbV_c\rho_mE_{O_2}/M_{Fe}$ — параметр, равный мощности, которая выделилась бы при сгорании всего удаляемого железа). Величина η определялась из выражения $\eta = P_{Fe}/P_{Fe}^{all}$ (см. табл. 3).

Из табл. 4 следует, что только 30–35 % окислившегося железа вносит вклад в полный энергетический баланс лазерной резки. Часть металла может дополнительно окислиться, например двигаясь в виде капель, но этот процесс уже не оказывает влияния на нагрев разрезаемого листа.

Оценим, какое количество кислорода необходимо для окисления 30 % удаляемого металла. Из реакции (3) следует, что для окисления количества железа, равного 1 моль, необходимо количество молекулярного кислорода, равное 0,5 моль.

Массовый расход кислорода $dM_{O_2}/d\tau$, необходимый для окисления железа, можно найти из выражения

$$\frac{dM_{O_2}}{d\tau} = 0,5\eta \frac{dM_{Fe}}{d\tau} \frac{M_{O_2}}{M_{Fe}}$$

($M_{O_2} = 32$ г/моль — молярная масса кислорода).

В табл. 4 приведены также результаты расчета величины $dM_{O_2}/d\tau$. Количество кислорода, поступающего в зону резки, оценим из следующих выражений:

$$\frac{d(M_{gas})_{O_2}}{d\tau} \approx \frac{\pi b^2}{4} \rho_{gas} V_{gas}, \quad V_{gas}^2 = \frac{2C_0^2}{k-1} \left[1 - \left(\frac{P_{atm}}{P_{atm} + \Delta P} \right)^{(k-1)/k} \right].$$

Здесь V_{gas} — скорость газа в щели, найденная с помощью уравнения Бернулли; ρ_{gas} — плотность газа; C_0 — скорость звука; P_{atm} — атмосферное давление.

В условиях проведенного эксперимента (см. табл. 1) при $\rho_{gas} \simeq 1,4 \cdot 10^{-6}$ г/мм³ получаем $V_{gas} \simeq 240 \cdot 10^3$ мм/с и значения $dM_{O_2}/d\tau$ (см. табл. 4). Приведенные данные показывают, что количество газа, поступающего через сечение $\pi b^2/4$, лишь в 1,5 раза превышает количество кислорода, используемого для окисления железа. Поскольку реальное течение газа в щели и его взаимодействие с поверхностью не учитываются, можно предположить, что именно количество кислорода ограничивает массу окисленного железа. Отметим, что увеличение расхода кислорода, т. е. увеличение давления ΔP при резке толстых листов металла, обычно приводит к возникновению неконтролируемого горения.

Для анализа зависимости различных потоков энергии от толщины материала запишем уравнение баланса энергии лазерной резки стали с кислородом в безразмерном виде.

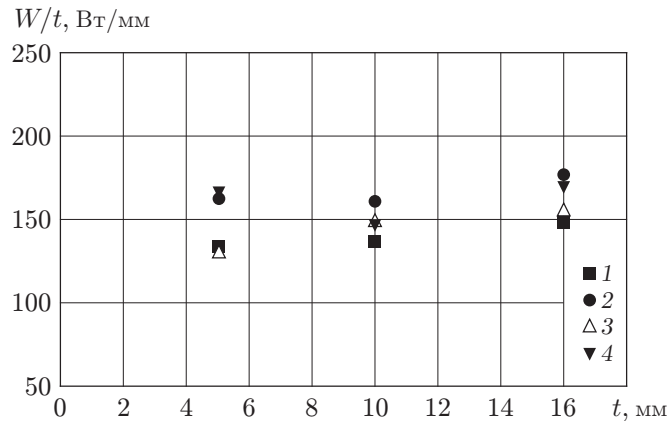


Рис. 4. Экспериментальные зависимости величин P_m/t (1), P_{cond}/t (2), AW_r/t (3), P_{Fe}/t (4) от толщины металла

Разделив выражение (1) на величину $k_m t \Delta T$ и используя (2), (4), получаем

$$A \frac{W_r}{k_m t \Delta T} + Pe \frac{\eta E_{O_2}}{M_{Fe} C_m \Delta T} = Pe \left(1 + \frac{\lambda_m}{C_m \Delta T} \right) + Q. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что при $W_r/(k_m t \Delta T) = \text{const}$, $Pe = \text{const}$ (как и в проведенных экспериментах) остаются только два свободных параметра: η и $Q = P_{cond}/(k_m t \Delta T)$. Однако экспериментальные данные показывают, что доля окислившегося железа η не зависит от толщины разрезаемого листа стали при экспериментальном разбросе, не превышающем 10 % (см. табл. 4). Тогда из (7) следует, что все энергетические потоки, представленные в безразмерном виде, являются одинаковыми для всех исследованных толщин при условии качественного реза.

Экспериментальные значения величин P_m/t , P_{cond}/t , AW_r/t и P_{Fe}/t , полученные при толщине разрезаемого листа металла 5, 10 и 15 мм, показаны на рис. 4. Видно, что данные величины не зависят от t . Отметим еще одно важное обстоятельство: все удельные, т. е. отнесенные к единице толщины, значения потоков энергии приблизительно равны (см. рис. 4). Можно предположить, что такая энергетическая сбалансированность процесса лазерной резки стали с кислородом является одним из условий получения минимальной степени шероховатости поверхности.

Заключение. В работе впервые проведено комплексное исследование баланса энергии в процессе лазерно-кислородной резки стальных листов большой толщины при критических параметрах $W_r/t \simeq 200$ Вт/мм и значениях числа Пекле $Pe = 0,6 \div 0,7$, соответствующих минимальной степени шероховатости поверхности реза. В условиях данного эксперимента впервые получены следующие результаты:

1) измерен коэффициент поглощения излучения при резке листа стали толщиной 5 ÷ 16 мм;

2) показано, что в процессе резки происходит окисление железа $\eta = 30 \div 36$ %, причем степень окисления в пределах экспериментального разброса не зависит от толщины металла;

3) установлено, что при лазерной резке стали все потоки энергии, входящие в уравнение энергетического баланса (мощность излучения лазера W_r ; мощность экзотермической реакции окисления железа кислородом P_{Fe} ; мощность P_m , затрачиваемая на плавление металла в зоне реза; мощность P_{cond} , теряемая в зоне реза за счет теплопроводности в окружающий металл) и отнесенные к единице толщины листа, не зависят от t ;

4) показано, что входящие в уравнение энергетического баланса удельные потоки мощности (AW_r/t , P_m/t , P_{cond}/t , P_{Fe}/t) для листов толщиной 5, 10 и 16 мм имеют близкие значения. Экспериментальный разброс этих величин находится в интервале $130 \div 170$ Вт/мм. Можно предположить, что этот результат обусловлен выбранными режимами резки [10, 11], соответствующими минимальной степени шероховатости поверхности реза. Нарушение подобной симметрии за счет неоптимально заданных параметров резки, преобладание какого-либо одного фактора, например излишек мощности экзотермической реакции окисления железа кислородом или возрастание P_{cond} , могут приводить к ухудшению качества поверхности вследствие возникновения неконтролируемого горения или перегрева зоны реза.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Powell J.** LIA guide to laser cutting. Orlando: Laser inst. of Amer., 2008.
2. **Petring D., Schneider F., Wolf N., Nazery V.** The relevance of brightness for high power laser cutting and welding // Proc. of the 27th Intern. congress on applications of lasers and electro-optics, Temecula, Oct. 20–23, 2008. P. 95–103. [Electron. resource].
3. **Arai T.** Current challenges to laser cutting application // Proc. of the 3rd Pacific intern. conf. on applications of lasers and optics, Beijing (China), Oct. 20–23, 2008. P. 10–15. [Electron. resource].
4. **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.
5. **Steen W.** Laser material processing. L.: Springer-Verlag, 2003.
6. **LIA Handbook of laser materials processing** / Ed. by J. F. Ready. Orlando: Laser inst. of Amer.: Magnolia Publ. Inc., 2001. P. 430–431.
7. **Афонин Ю. В., Гольшев А. П., Иванченко А. И. и др.** Генерация излучения с высоким качеством пучка в непрерывном CO₂-лазере мощностью 8 кВт // Квантовая электрон. 2004. Т. 34, № 4. С. 307–309.
8. **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.
9. **Black I.** A comparison of severance energies for reactive CO₂-laser cutting of mild steel // Intern. J. Advanced Manufactur. Technol. 1999. V. 15. P. 832.
10. **Фомин В. М., Маликов А. Г., Оришич А. М., Шулятьев В. Б.** О законах подобия газолазерной резки толстых стальных листов // Докл. АН. 2009. Т. 428, № 3. С. 295–429.
11. **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.
12. **Базылева И. О., Галушкин М. Г., Голубев В. С. и др.** Термические потери в процессе газолазерной резки металлов // Современные лазерно-информационные и лазерные технологии: Сб. тр. Ин-та пробл. лазер. и информ. технол. М.: Интерконтакт Наука, 2005. С. 221–227.
13. **Miyamoto I., Maruo H.** Mechanism of laser cutting / Osaka Univ. Dep. Weld. Prod. Engng. IJW Doc. NIE-LCWG-88.011. Osaka, 1988. P. 1–21.

Поступила в редакцию 26/IV 2010 г.