

# Экспериментальная оптимизация газолазерной резки толстых стальных листов

А.Г.Маликов, А.М.Оришич, В.Б.Шулятьев

*Представлены результаты экспериментальной оптимизации процесса лазерной резки листов низкоуглеродистой стали толщиной 5–25 мм. Резка проводилась с помощью CO<sub>2</sub>-лазера, в качестве вспомогательного газа использовался кислород. Установлено, что минимум шероховатости поверхности достигается в том случае, если во всем диапазоне толщин остаются постоянными лазерная энергия, приходящаяся на единицу объема удаляемого материала, и мощность на единицу толщины листа. Эти величины равны ~200 Дж/мм<sup>3</sup> и ~200 Вт/мм. Им соответствует постоянное значение числа Пекле  $Pe = 0.5$ . Результаты позволяют определить оптимальные для данной толщины листа мощность излучения и скорость резки. В пределе больших толщин условия резки, при которых шероховатость минимальна, записываются в виде соотношений между безразмерными переменными.*

**Ключевые слова:** лазерная резка, критерии качества реза, оптимизация, безразмерные параметры.

## 1. Введение

Лазерная резка металлов в настоящее время успешно применяется на практике и ее параметры продолжают улучшаться [1, 2]. Существует несколько разновидностей лазерной резки [1]. Наиболее распространена газолазерная резка низкоуглеродистой стали в атмосфере химически активного газа (кислорода). Лазерная резка характеризуется высокой скоростью обработки, при этом интерес представляет получение качественного реза. Показателями качества реза являются количество грата (застывших капель расплава на нижней кромке реза), шероховатость поверхности реза, ширина зоны термического влияния, наклон стенок реза.

Несмотря на большое число теоретических и экспериментальных исследований, в настоящее время отсутствует полная и взаимосвязанная физическая картина образования реза [2, 3], а условия получения качественного реза не сформулированы. Это связано, прежде всего, с многообразием и сложным взаимодействием протекающих при лазерной резке физических процессов. Главными из них 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, а также движение пленки расплава под действием потока газа. Шероховатость поверхности реза, которая является одним из основных критериев качества реза, зависит от динамики распространения фронта плавления и от осо-

бенностей течения пленки расплава [4]. Обзор механизмов образования неустойчивостей течения расплава, которые могут приводить к ухудшению качества лазерного реза, дан, например, в [5].

В работах по теоретическому моделированию процесса газолазерной резки связь мощности лазерного излучения и скорости резки определяется на основе баланса энергии (см., напр., [6, 7]). Такой подход позволяет найти максимальную скорость резки. Известно, что максимальная скорость не обязательно является оптимальной с точки зрения качества реза [8]. Кроме того, ряд важных параметров, входящих в энергетический баланс, например коэффициент поглощения излучения в канале реза и энергия экзотермической реакции окисления железа, сложным образом зависят от условий резки и не всегда могут быть получены с требуемой точностью. Это затрудняет надежное определение даже максимальной скорости резки.

В связи с вышесказанным продолжает оставаться актуальным экспериментальный поиск оптимальных условий качественного реза. К настоящему времени накоплена довольно обширная база данных по лазерной резке, но она относится главным образом к области тонких листов (толщиной менее 10 мм) [1, 8, 9]. Современные технологические CO<sub>2</sub>-лазеры позволяют качественно резать листы толщиной до 25 мм [1]. Увеличение мощности излучения является одним из основных направлений совершенствования лазеров для резки, что дает возможность увеличивать и толщину разрезаемых листов. Кроме того, корректное сопоставление данных из разных источников для выявления общих закономерностей не всегда возможно, т. к. опубликованные результаты экспериментальных исследований часто содержат неполные наборы данных или проводятся при разных условиях. Также не всегда ясно формулируются критерии качества, которые, вообще говоря, могут быть, разными для каждого из показателей качества реза [10].

Цель настоящей работы – экспериментальный поиск оптимальных условий лазерной резки листов низкоугле-

А.Г.Маликов, А.М.Оришич, В.Б.Шулятьев. Институт теоретической и прикладной механики им. С.А.Христиановича СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Институтская, 4/1; e-mail: shulyat@rambler.ru, laser@itam.nsc.ru

Поступила в редакцию 29 декабря 2008 г., после доработки – 20 марта 2009 г.

родистой стали большой толщины в атмосфере кислорода. В качестве критерия качества реза выбрана величина шероховатости поверхности реза при отсутствии грата.

## 2. Методика экспериментов

Эксперименты по резке проводились на созданном в ИТПМ СО РАН лазерном технологическом комплексе на основе непрерывного CO<sub>2</sub>-лазера с параметром качества пучка BPP (beam parameter product, произведение радиуса пучка в ближней зоне на угловой радиус пучка в дальней зоне), равным 4.7 мм·мрад [11]. Резка проводилась излучением с круговой поляризацией по традиционной схеме. Излучение фокусировалось одиночной линзой из ZnSe. Для регулировки положения перетяжки лазерного пучка относительно газового сопла линза была снабжена механизмом перемещения с отсчетным устройством. Соосно с лазерным пучком в зону резки подавалась струя технологического газа (кислорода) чистотой 99.999 %. Давление вспомогательного газа измерялось в камере режущей головки с погрешностью 0.01 кг/см<sup>2</sup>. Во время резки зазор между газовым соплом и листом стабилизировался с помощью системы слежения на основе емкостного датчика. Разрезались листы углеродистой стали обыкновенного качества (Ст.Зпс) толщиной от 5 до 25 мм.

Обработка больших объемов данных существенно упрощается, если удастся представить их в виде зависимостей между безразмерными комбинациями параметров, как это делается при анализе сложных физических систем методом подобия. Это позволяет уменьшить число независимых переменных и найти характеристические параметры данной задачи. При определении таких параметров будем исходить из следующих представлений: энергия выделяется на фронте реза более или менее равномерно по глубине канала реза, толщина разрезаемого листа намного превышает ширину канала реза, вынос материала из канала происходит под действием струи газа.

Основными исходными параметрами при лазерной резке являются толщина  $t$  разрезаемого листа, мощность  $W$  лазерного излучения, скорость  $v$  резки, давление  $p$  вспомогательного газа на входе в канал реза. Ширина  $b$  реза может быть легко измерена. Используя эти параметры, можно составить следующие безразмерные комбинации:  $W/(\lambda t T_m)$ ,  $vb/\gamma$ ,  $b/t$ , где  $\lambda$  и  $T_m$  – соответственно теплопроводность и температура плавления материала;  $\gamma = \lambda/(\rho c)$  – температуропроводность;  $\rho$  и  $c$  – плотность и удельная теплоемкость. Переменные  $W/(\lambda t T_m)$  и  $vb/\gamma$  возникают в задачах с движущимся протяженным тепловым источником [12]. Величина  $W/(\lambda t T_m)$  пропорциональна удельной мощности протяженного источника, а отношение  $vb/\gamma$  известно как число Пекле Pe. Отношение  $b/t$  можно рассматривать как параметр, характеризующий силовое воздействие газового потока на пленку расплава.

При течении газа в трубе постоянного сечения при постоянном градиенте давления на длине, равной  $t$  (течение Пуазейля), величина  $b/t$  определяет соотношение сил вязкого трения и давления:  $b/t = 4\tau/p$  ( $\tau$  – касательное напряжение) [13]. Параметры  $W$ ,  $t$ ,  $b$ ,  $v$ , которые входят в безразмерные комбинации, могут быть найдены экспериментально.

Эксперименты проводились следующим образом. Для каждой выбранной толщины листа выполнялись две серии измерений. В первой серии проводился выбор фокусного расстояния  $f$  линзы и давления кислорода в камере режущей головки. Для этого методом последовательных приближений определялись диапазоны значений  $W$  и  $v$ , а также положений  $\Delta f$  перетяжки пучка по отношению к поверхности листа, соответствующие наиболее качественному резу. Во второй серии находилась зависимость шероховатости и ширины реза от мощности излучения, скорости резки и положения перетяжки лазерного пучка по отношению к поверхности листа. Начальные значения  $W$  и  $v$  выбирались примерно в середине областей этих параметров, соответствующих качественным резам. Начальное положение перетяжки выбиралось таким, чтобы ширина реза была минимальной. Из полученных зависимостей определялись значения  $v$ ,  $b$ ,  $W$ , соответствующие минимуму шероховатости. Толщины листов, а также величины  $f$ ,  $p$  и диапазоны мощностей, для которых проводились измерения, представлены в табл.1. С ростом толщины листа диапазон мощностей, обеспечивающих качественную резку, сужается, что связано с возрастанием пороговой мощности резки. По этой причине более детально зависимость шероховатости от мощности исследовалась при толщине листа до 20 мм. Фотография образца реза при толщине листа 25 мм показана на рис.1.

Табл.1.

$t$ (мм)	$W$ (кВт)	$f$ (мм)	$p$ (кг/см <sup>2</sup> )
5	0.37–3.5	127, 190	0.5
10	0.9–3	190	0.5
16	1.2–4	190	0.4
20	3–4.5	190	0.4
25	4–4.5	254	0.35

Шероховатость поверхности реза измерялась на расстояниях, равных  $\frac{1}{3}t$  и  $\frac{2}{3}t$ , от верхней поверхности листа. Для характеристики образца принималось максимальное из двух значений. Измерения проводились с помощью лазерного конфокального сканирующего микроскопа Olympus LEXT. Микроскоп позволяет методом послойного сканирования получить трехмерную картину поверхности и определить величину шероховатости в выбранном сечении.

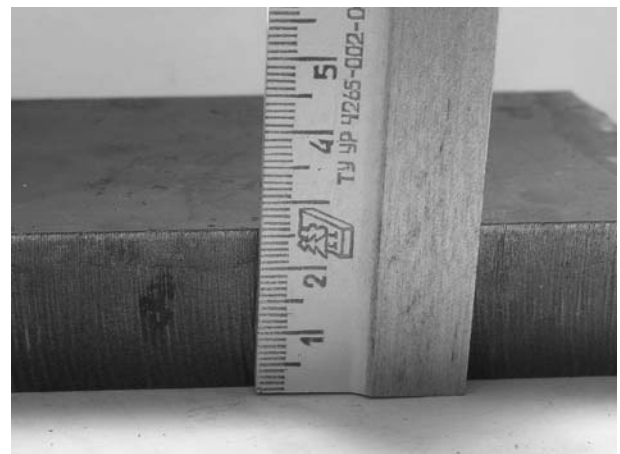


Рис.1. Образец реза при  $t = 25$  мм,  $W = 4.5$  кВт,  $v = 0.6$  м/мин.

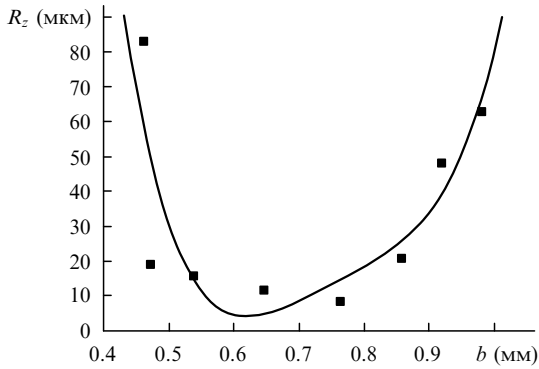


Рис.2. Зависимость шероховатости поверхности от ширины реза при  $t = 5$  мм,  $W = 2.3$  кВт.

### 3. Результаты экспериментов и их обсуждение

По описанной выше методике получен достаточно большой объем экспериментальных данных для разных толщин листа и мощностей излучения, приведенных в табл.1. На рис.2 представлена зависимость шероховатости  $R_z$  от ширины реза при  $t = 5$  мм. Для ее получения вначале при выбранном значении мощности определялась величина  $\Delta f$ , при которой рез имеет минимальную ширину. Затем при таком  $\Delta f$  находилась скорость, соответствующая минимуму шероховатости. Далее при этой скорости измерялась зависимость  $R_z$  и  $b$  от  $\Delta f$ . По результатам измерений строилась зависимость  $R_z$  от  $b$ .

На рис.3 показана зависимость скорости резки, соответствующей минимальной шероховатости, от мощности излучения при  $t = 5$  мм. Для получения этой зависимости для каждого значения мощности определялась величина  $\Delta f$ , при которой шероховатость  $R_z$  минимальна. Затем при таком  $\Delta f$  и соответствующей мощности измерялась зависимость  $R_z$  от скорости и определялись скорость и ширина реза, соответствующие минимуму шероховатости. Далее измерения повторялись для других значений мощности.

Аналогичные зависимости получены при  $t = 10$  и  $16$  мм. Результаты оптимизации для всего диапазона толщин представлены на рис.4,а в координатах  $W, v$ . Здесь приведены зависимости оптимальной скорости резки от мощности (некоторые точки получены в контрольной серии экспериментов). На рис.4,б представлены те же данные, но в координатах  $W/t, vb$ .

Из рис.4,б видно, что в координатах  $W/t, vb$  все экспериментальные точки можно описать одной зависимо-

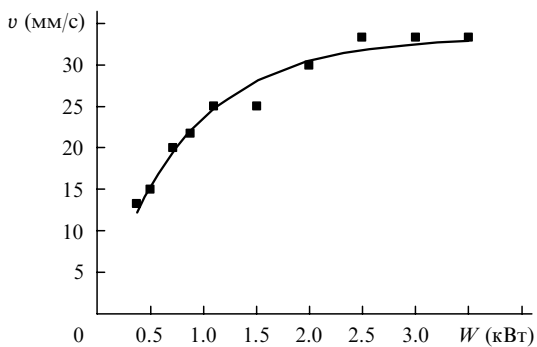


Рис.3. Зависимость оптимальной скорости резки от мощности излучения при  $t = 5$  мм,  $f = 190$  мм.

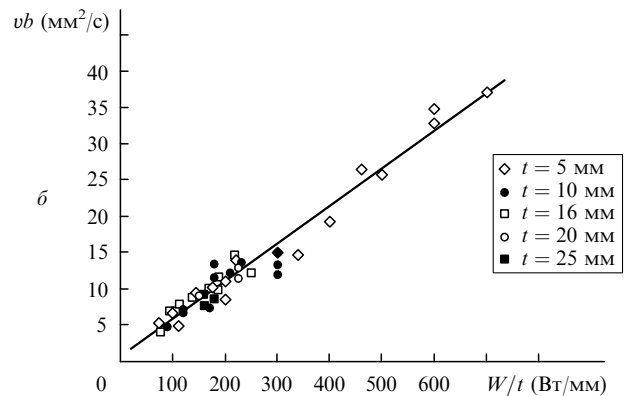
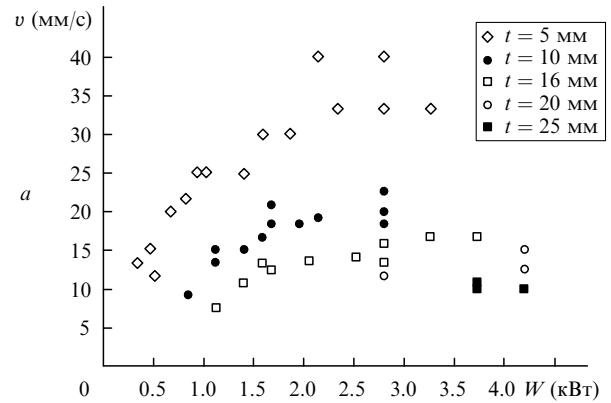


Рис.4. Зависимости оптимальной скорости резки от мощности излучения в координатах  $W, v$  (а) и  $W/t, vb$  (б) при различных толщинах листа  $t$ .

стью. Эта зависимость близка к линейной, характеризуемой коэффициентом  $W/(vtb) = 19.4$  Вт/мм<sup>3</sup>, т. е. для всех диапазонов толщин и мощностей при условии минимума  $R_z$  вклад лазерной энергии в единицу объема удаляемого вещества остается постоянным. При этом связь между безразмерными параметрами может быть представлена в следующем виде:

$$\frac{W}{\lambda t T_m} = (1 + Sf) \frac{W}{vtb\rho(cT_m + L_m)} Pe, \tag{1}$$

где  $L_m$  – удельная теплота плавления материала;  $Sf = L_m/(cT_m)$  – число Стефана.

Зависимость на рис.4,б дает скорость резки, при которой шероховатость минимальна для данных значений толщины и мощности. При этом шероховатость зависит от мощности. Установлено, что при  $t = 5$  и  $10$  мм зависимость  $R_z$  от мощности имеет минимум. Определить наличие минимума при больших толщинах не позволила ограниченная мощность лазера. Зависимости  $R_z$  от  $v$  и  $W$  представлены на рис.5 в координатах  $R_z/t, W/(\lambda t T_m), vb/\gamma$ , теплофизические параметры взяты для чистого железа при нормальных условиях.

Величины  $W/t$ , соответствующие минимуму зависимости  $R_z(W)$ , для толщин 5 и 10 мм приведены в табл.2. Здесь же даны  $W/t$  для образцов с минимальной шероховатостью при толщинах более 10 мм. Видно, что для всего диапазона толщин минимум достигается при близких значениях  $W/t$ . Среднему для всех толщин значению  $W/t = 194$  Вт/мм можно поставить в соответствие безразмерный параметр  $W/(\lambda t T_m) = 1.6$ , которому согласно (1) соответствует число Пекле  $Pe = 0.5$ .

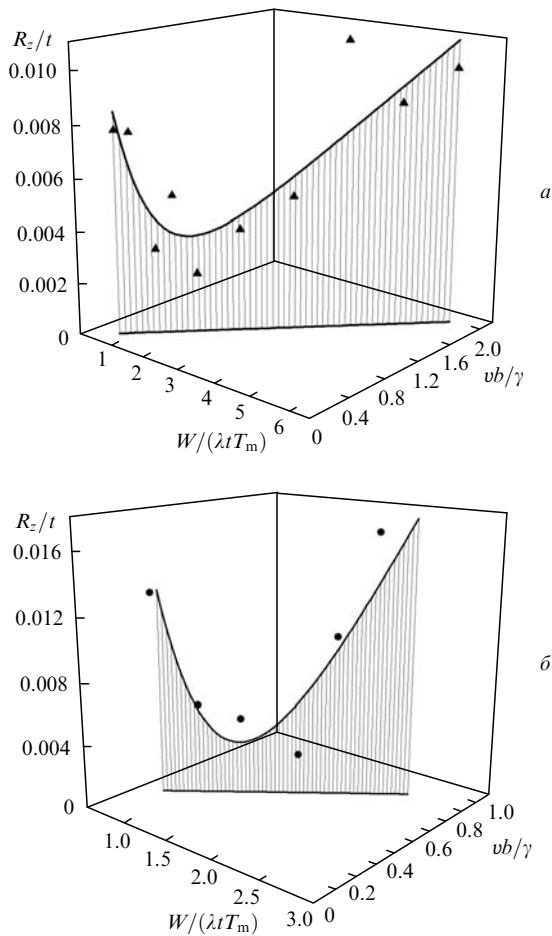


Рис.5. Зависимости шероховатости поверхности реза от мощности излучения и скорости резки в безразмерных координатах при  $t = 5$  (а) и 10 мм (б).

Табл.2.

$t$ (мм)	$W/t$ (Вт/мм)
5	220
10	180
16	190
20	200
25	180

Известно, что качественная лазерная резка имеет место в ограниченном диапазоне чисел Пекле [5, 7]. В [5] сообщается о возможности существования оптимального числа Пекле. В настоящей работе найдено его точное значение, задающее однозначный количественный критерий качества реза.

Ширина реза, при которой поверхность реза имеет минимальную шероховатость, растет с ростом толщины листа. На рис.6 показана зависимость ширины реза от толщины листа при тех значениях  $W, v, \Delta f$ , при которых шероховатость поверхности реза минимальна. При толщине листа 25 мм использовалась линза с  $f = 254$  мм, при меньших толщинах – линза с  $f = 190$  мм. При линейной аппроксимации зависимость имеет вид  $b = 0.35 + 0.02t$ . Зависимость  $b(t)$  такого же вида получена авторами [7] на основе анализа экспериментальных данных для толщин 1 – 12.7 мм.

Задаваемыми параметрами при лазерной резке являются толщина листа, мощность излучения и скорость резки. Используя найденные оптимальные значения  $W/t$ ,

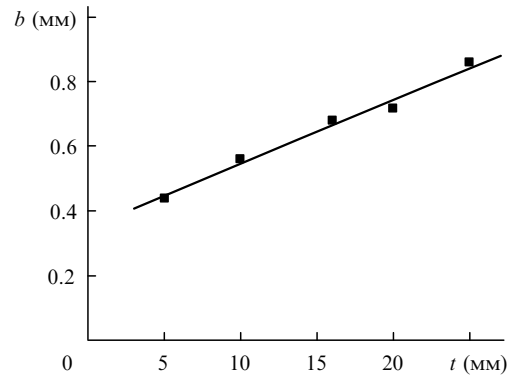


Рис.6. Зависимость ширины реза, соответствующей минимуму шероховатости, от толщины листа.

$vb$  и зависимость  $b(t)$ , для параметров резки, соответствующих минимальной шероховатости, можно записать следующие соотношения:

$$W = 190t, \quad v = \frac{11}{0.35 + 0.02t}, \quad (2)$$

где  $W$  взято в Вт,  $v$  – в мм/с, а  $t$  – в мм. При больших толщинах, когда первым слагаемым в знаменателе выражения для скорости в (2) можно пренебречь, эти соотношения могут быть записаны в безразмерном виде:

$$\frac{W}{\lambda t T_m} = 1.6, \quad \frac{vt}{\gamma} = 24.$$

Для практических оценок представляет интерес величина  $W/v$  – затраты лазерной энергии на единицу длины реза. Из (2) следует, что

$$\frac{W}{v} = 6t + 0.35t^2. \quad (3)$$

Затраты энергии при лазерной резке иногда оценивают, исходя из условия  $W/(vt) = \text{const}$ , ширина реза считается при этом постоянной [8]. Из (3) следует, что областью применимости таких оценок являются малые толщины, когда можно пренебречь вторым слагаемым из-за малости числового коэффициента перед  $t^2$ . Соотношение (3) согласуется с результатами работы [14], где собрана из разных источников информация о величине  $W/(vt)$  для резки листов низкоуглеродистой стали толщиной до 20 мм (большая часть данных относится к толщинам менее 10 мм) в атмосфере кислорода. Все представленные в [14] данные находятся в диапазоне  $W/(vt) = 6 - 13$  Дж/мм<sup>2</sup>, причем большим толщинам соответствуют большие значения  $W/(vt)$ .

#### 4. Заключение

Для лазерной резки низкоуглеродистой стали в атмосфере кислорода в качестве вспомогательного газа экспериментально исследована зависимость шероховатости поверхности от параметров резки при толщине листов 5 – 25 мм. Установлено, что минимум шероховатости поверхности достигается в том случае, если во всем диапазоне толщин остаются постоянными лазерная энергия, приходящаяся на единицу объема удаляемого материала, и мощность на единицу толщины листа. В безразмер-

ном виде эти условия записываются следующим образом:  $W/[v\tau\rho(cT_m + L_m)] = \text{const}$ ,  $W/(\lambda t T_m) = \text{const}$ . Им соответствует постоянное значение числа Пекле  $Pe = 0.5$ .

Найдена также зависимость ширины реза от толщины разрезаемого листа. Это позволило представить результаты экспериментов в виде соотношений, связывающих мощность излучения и скорость резки, при которых шероховатость поверхности минимальна для данной толщины. В пределе больших толщин эти соотношения записываются в безразмерном виде.

1. Powell J. *LIA Guide to Laser Cutting* (Orlando: Laser Institute of America, 2008).
2. Petring D., Schneider F., Wolf N., Nazery V. *Proc. 27th Int. Congr. on Applications of Lasers and Electro-Optics* (Temecula, USA, 2008, pp 95–103).
3. Powell J., Petring D., Kumar R.V., Al-Mashikhi S.O., Kaplan A.F.H., Voisey K.T. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **42**, 015504 (2009).
4. Poprave R., Weber H., Herziger G. *Laser Physics and Applications Subvolume C: Laser Applications* (Berlin: Springer-Verlag, 2004).
5. Голубев В.С. В кн.: *Современные лазерно-информационные и лазерные технологии (Сборник трудов ИПЛИТ РАН)* (М.: Интерконтакт Наука, 2005, с. 209).
6. Li Y., Latham W.P., Kar A. *Opt. Lasers Eng.*, **35**, 371 (2001).
7. Prusa J.M., Venkitachalam G., Molian P.A. *Int. J. Machine Tools Manufacture*, **39**, 431 (1999).
8. Steen W. *Laser Material Processing* (London: Springer-Verlag, 2003).
9. Ready J.F. (Ed.) *LIA Handbook of Laser Materials Processing* (Orlando: Laser Institute of America, Magnolia Publ. Inc., 2001).
10. Rajaram N., Sheikh-Ahmad J., Cheraghi S.H. *Int. J. Machine Tools Manufacture*, **43**, 351 (2003).
11. Афонин Ю.В., Гольшев А.П., Иванченко А.И., Малов А.Н., Оришич А.М., Печурин В.А., Филев В.Ф., Шулятьев В.Б. *Квантовая электроника*, **34**, 307 (2004).
12. Карслоу Г., Егер Д. *Теплопроводность твердых тел* (М.: Наука, 1964, с. 262).
13. Лойцанский Л.Г. *Механика жидкости и газа* (М.: Наука, 1978, с. 382).
14. Black I. *Int. J. Adv. Manufacturing Technol.*, **15**, 832 (1999).