

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНЫМ ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ

А. Н. Шемякин, М. Ю. Рачков, Н. Г. Соловьев

В статье представлены результаты исследования временных характеристик мощности излучения лазерного технологического комплекса с несамостоятельным тлеющим разрядом и определено их влияние на технологические возможности комплекса. Исследованы амплитудные изменения мощности лазерного излучения с частотой импульсов ионизации. Для мощности лазерного излучения вычислены эмпирические средние значения и эмпирическое стандартное отклонение. По этим оценкам определена относительная флуктуация мощности.

Ключевые слова: лазер, мощность излучения, ионизация, флуктуация, технологические возможности.

Введение

Одним из самых распространенных способов получения активной среды технологических лазеров является газовый разряд [1]. Использование несамостоятельного тлеющего разряда, в котором функции ионизации газа и вклада энергии в разряд разделены между двумя источниками, позволило добиться значительного прогресса в области создания мощных CO_2 -лазеров. В несамостоятельном тлеющем разряде ионизация газа в объеме поддерживается за счет внешнего ионизатора, мощность которого составляет единицы процентов от суммарной мощности, вкладываемой в полученную плазму разрядом постоянного тока. Основные схемы организации несамостоятельных тлеющих разрядов, используемых в лазерах, описаны в работе [2].

Несамостоятельный тлеющий разряд с импульсной емкостной ионизацией обладает рядом преимуществ по сравнению с другими типами несамостоятельных разрядов. В отличие от разряда с ионизацией электронным пучком он не сопровождается рентгеновским излучением и не требует биологической защиты персонала. По сравнению с несамостоятельным тлеющим разрядом с импульсной электродной ионизацией он имеет существенно упрощенную конструкцию газоразрядной камеры за счет отсутствия секционирования и баллаستирования электродов.

Все эти качества выгодно выделяют несамостоятельный тлеющий разряд с импульсной емкостной ионизацией среди других разрядов и открывают широкие перспективы для его ис-

пользования в технологических лазерах.

Целью работы является исследование временных характеристик мощности излучения лазерного технологического комплекса на базе лазера с несамостоятельным тлеющим разрядом с импульсной емкостной ионизацией и их влияния на технологические возможности комплекса при резке материалов с высоким коэффициентом отражения.

Лазерный технологический комплекс (ЛТК) с несамостоятельным тлеющим разрядом (НТР) представляет собой универсальный двухкоординатный комплекс портального типа с перемещением оптики. Он предназначен для резки, сварки и модификации поверхности различных материалов. Комплекс имеет поле обработки размером 800×1135 мм. Максимальная скорость перемещения достигает 60 м/мин, а наибольшее ускорение по координатам – 5 м/с². Точность воспроизведения контура составляет ± 0,03 мм. На комплексе можно резать конструкционную сталь толщиной до 10 мм, нержавеющей сталь и латунь толщиной до 6 мм, а также алюминиевые сплавы толщиной до 5 мм.

Комплекс состоит из технологического лазера с НТР, микропроцессорного устройства управления и координатного стола с персональным компьютером для ввода управляющих программ.

Важнейшим элементом ЛТК является лазер, в основе которого лежит оригинальный способ организации тлеющего разряда в камере большого объема – несамостоятельный тлеющий разряд с импульсной емкостной ионизацией. Лазер выполнен в виде моноблока, который требует подвода охлаждающей воды, электроэнергии, сжатого воздуха и рабочих газов [3].

Основные особенности лазера:

- быстрое управление мощностью излучения;
- возможность работы как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме с регулируемой скважностью и длительностью импульсов, возможность перехода из одного режима в другой;
- высокая оптическая однородность и стабильность разряда;
- высокое качество излучения;
- простота электродной системы – отсутствует секционирование и балластирование электродов;

– высокий КПД;

– малое потребление рабочих газов, возможность работы в отпаянном режиме и на безгелиевых смесях.

Способ организации тлеющего разряда определяет временные характеристики мощности лазерного излучения, которые исследуются в данной работе и влияют на процесс металлообработки на ЛТК с несамостоятельным тлеющим разрядом.

Схема измерительного эксперимента

Проведение эксперимента потребовало специального метрологического обеспечения, так как было связано с быстродействующим аналого-цифровым преобразованием ($1 \cdot 10^6$ 1/с) малого сигнала мощности излучения ($\approx 0,1$ В) на фоне мощных электромагнитных помех, создаваемых высоковольтным генератором импульсов ионизации (4 кВ, длительность импульсов около 100 нс).

Для измерения мощности излучения ЛТК необходим приемник излучения, который преобразует излучение в электрический сигнал, подлежащий измерению. В качестве быстродействующего приемника излучения было выбрано термоэлектрическое зеркало-приемник с анизотропией термоЭДС в пленке на основе висмута, теллура или других материалов, образующейся при наклонном угле конденсации [4]. Принцип действия приемника основан на возникновении термоЭДС в плоскости анизотропной пленки вследствие температурного градиента, создаваемого нагревом внешней поверхности пленки поглощенным излучением. Основными преимуществами приемника являются непосредственное измерение мощности широко-апертурного (диаметр 20–50 мм) интенсивного излучения и высокое быстродействие ($\approx 10^{-5}$ с). Термоэлектрическое зеркало-приемник с анизотропией термоЭДС обладает линейной характеристикой в диапазоне мощности излучения от 0 до 3 кВт и может быть использовано в качестве датчика при исследовании временных характеристик мощности излучения ЛТК с несамостоятельным тлеющим разрядом [5].

Эксперименты проводились на ЛТК с несамостоятельным тлеющим разрядом «Лантан-3» (рис. 1).

Излучение 3 лазера 1 с помощью системы транспортировки и фокусировки излучения подается в режущую головку координатного



Рис. 1. Лазерный технологический комплекс с несамостоятельным тлеющим разрядом «Лантан-3»

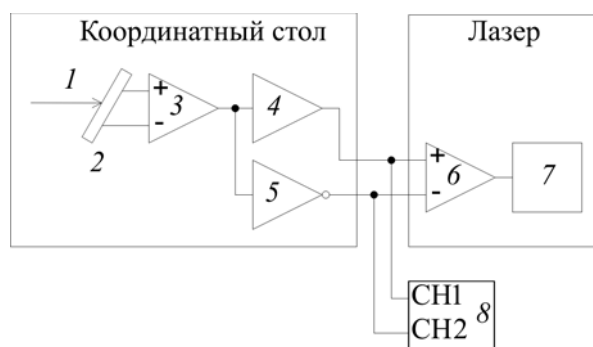


Рис. 2. Схема эксперимента

стола 2. Термоэлектрическое зеркало-приемник, которое совмещает в себе функции оптического зеркала и приемника излучения, установлено во втором блоке поворотных зеркал 4.

Излучение 1 подается на термоэлектрическое зеркало-приемник 2 (рис. 2). Сигнал с зеркала-приемника поступает на предварительный дифференциальный усилитель 3. Усиленный сигнал подается на входы неинвертирующего усилителя 4 и инвертирующего уси-

лителя 5 для передачи его в ЛТК. Оконечный дифференциальный усилитель 6 усиливает поступившие сигналы, подавляя при этом синфазные помехи, возникшие при передаче сигналов. Сигнал с усилителя 6 поступает в устройство измерения и стабилизации мощности ЛТК 7. Выходные сигналы усилителей 4 и 5 регистрируется каналами CH1, CH2 цифрового запоминающего осциллографа 8. Основные параметры осциллографа TDS2014 фирмы Tektronix приведены ниже.

Результаты эксперимента и их обработка

Пример осциллограммы сигналов с зеркала-приемника приведен на рис. 3.

Треугольная стрелка на вертикальной стороне экрана слева указывает нулевой уровень сигналов. Записано по 2500 точек на каждый канал с частотой выборки $1 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$. Сигнал с зеркала-приемника соответствует мощности излучения 750 Вт (см. рис. 3).

Сигнал с зеркала-приемника U определяется как

$$U = U_{CH1} - U_{CH2},$$

где U_{CH1} – сигнал с выхода неинвертирующего усилителя 4 (см. рис. 2); U_{CH2} – сигнал с выхода инвертирующего усилителя 5 (см. рис. 2).

Мощность излучения ЛТК равна

$$W = kU,$$

где $k = 2478,4 \text{ Вт/В}$ – коэффициент преобразования схемы «зеркало-приемник – усилитель».

В результате проведения двух серий экспериментов по изучению формы сигнала мощности излучения ЛТК в диапазоне от 200 до 800 Вт были получены 22 цифровые осциллограммы.

На рисунке 4, а, где показана форма сигнала мощности W , соответствующая осциллограмме на рис. 3, ясно видны амплитудные изменения

Основные параметры цифрового запоминающего осциллографа TDS2014

Число каналов	4
Полоса пропускания, МГц	100
Разрядность АЦП	8
Погрешность измерений	$\pm(3 \% \cdot \text{показание} + 0,1 \text{ дел.} + 1 \text{ мВ})$
Частота выборки, 1/с	$1 \cdot 10^9$
Количество отсчетов на каждый канал	2500
Связь с персональным компьютером	Коммуникационный модуль TDS2MEM с памятью 512 Мбайт

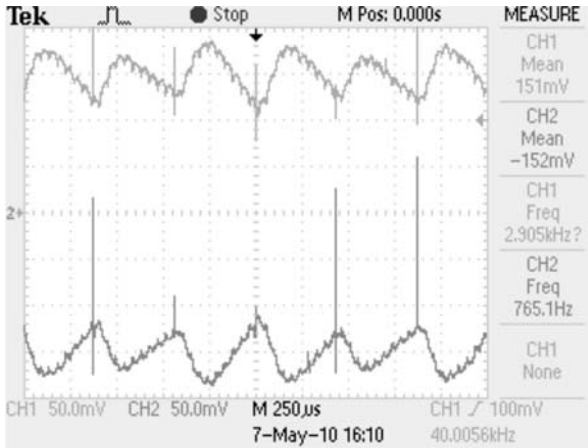


Рис. 3. Осциллограмма сигналов с зеркала-приемника (цена деления по вертикали – 50 мВ, по горизонтали – 250 мкс)

мощности излучения ЛТК с частотой импульсов ионизации и помехи, наводимые на сигнал этими импульсами.

Для устранения помех от импульсов ионизации применимо линейное сглаживание экспериментальных данных по пяти точкам [6]. Экспериментальные данные $y_0, y_1, y_2, \dots, y_{n-1}, y_n$ заменяются сглаженными $y_{s0}, y_{s1}, y_{s2}, \dots, y_{sn-1}, y_{sn}$, где

$$\begin{aligned} y_{s0} &= 0,2(3y_0 + 2y_1 + y_2 - y_4), \\ y_{s1} &= 0,1(4y_0 + 3y_1 + 2y_2 + y_3), \\ y_{sn-1} &= 0,1(y_{n-3} + 2y_{n-2} + 3y_{n-1} + 4y_n), \\ y_{sn} &= 0,2(3y_n + 2y_{n-1} + y_{n-2} - y_{n-4}), \\ y_{si} &= 0,2(y_{i-2} + y_{i-1} + y_i + y_{i+1} + y_{i+2}) \end{aligned}$$

для $i = 2, \dots, n-2$.

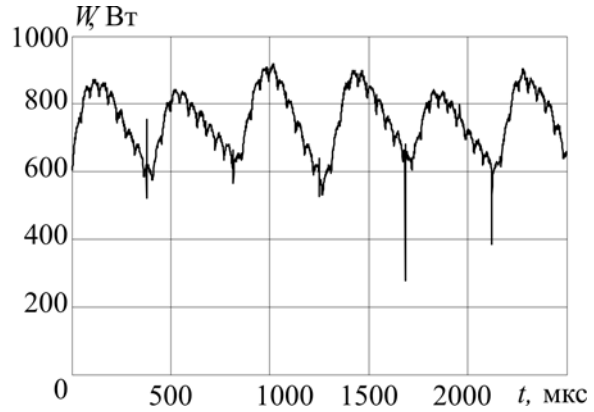
На рисунке 4, б показан результат линейного сглаживания экспериментальных данных по пяти точкам – помехи от импульсов ионизации исчезли. Оценим влияние сглаживания на параметры измеренного сигнала. Для этого вычислим эмпирические средние значения и эмпирические стандартные отклонения измеренного W и сглаженного W_s сигналов. Эмпирическое среднее значение измеренного сигнала W составило

$$\bar{W} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i = 752,167 \text{ Вт.}$$

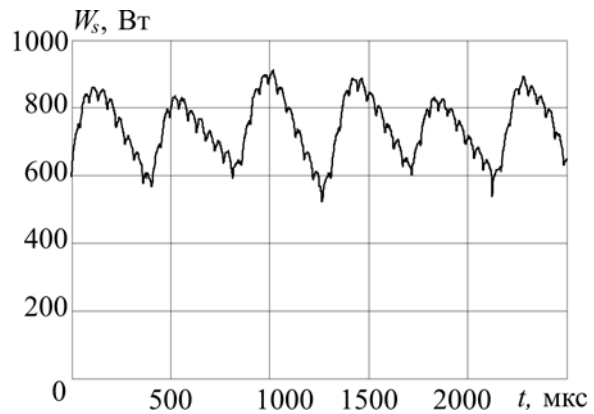
Эмпирическое среднее значение сглаженного сигнала W_s вычислялось по формуле

$$\bar{W}_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_{si} \quad (1)$$

и составило $\bar{W}_s = 752,301 \text{ Вт.}$



а



б

Рис. 4. Форма (а) и сглаженная форма (б) мощности излучения ЛТК 750 Вт

Эмпирическое стандартное отклонение измеренного сигнала W равно

$$s_W = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (W_i - \bar{W})^2} = 88,727 \text{ Вт.}$$

Эмпирическое стандартное отклонение сглаженного сигнала W_s вычислялось по формуле

$$s_{W_s} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (W_{si} - \bar{W}_s)^2} \quad (2)$$

и составило $s_{W_s} = 87,783 \text{ Вт.}$

Эмпирическое среднее значение сглаженного сигнала $\bar{W}_s$ больше эмпирического среднего значения измеренного сигнала $\bar{W}$ на величину

$$\Delta W = 100 \left(\frac{\bar{W}_s}{\bar{W}} - 1 \right) = 0,018 \text{ \%}.$$

Эмпирическое стандартное отклонение сглаженного сигнала s_{W_s} меньше эмпирического стандартного отклонения измеренного

сигнала s_W на $\Delta s = 100 \left(1 - \frac{s_{W_s}}{s_W} \right) = 1,06 \text{ \%}.$

Таким образом, эмпирическое среднее значение сглаженного сигнала практически не изменилось, а эмпирическое стандартное отклонение незначительно уменьшилось из-за устранения помехи от импульсов ионизации.

После предварительного линейного сглаживания по пяти точкам результаты 22 измерений обработаны по методике, изложенной в ГОСТ Р ИСО 11554 – 2008: «Методы испытаний лазеров и измерений мощности, энергии и временных характеристик лазерного пучка» [7]. Для сглаженной мощности излучения ЛТК $\overline{W_s}$ вычислены эмпирические средние значения $\overline{W_s}$ (1) и эмпирическое стандартное отклонение s_{W_s} (2). По этим оценкам определена относительная флуктуация мощности ΔP :

$$\Delta P = \pm \frac{2s_{W_s}}{\overline{W_s}}.$$

Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Вычислим среднее значение стандартного отклонения s_{W_s}

$$\overline{s_{W_s}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_{W_s} = 101,7 \text{ Вт.}$$

Для аналитического представления зависимости $s_{W_s} = f(\overline{W_s})$ применим полиномиальную регрессию второй степени вида $y = a_1 x^2 + a_2 x + a_3$. Для расчета коэффициентов многочлена воспользуемся функцией *regress* программы компьютерной математики *Mathcad 13* [8]. Уравнение полиномиальной регрессии принимает вид

$$Rgs_{W_s} = -6,87 \cdot 10^{-5} \overline{W_s}^2 + 0,029 \overline{W_s} + 107,55. \quad (3)$$

Таблица 1

Результаты обработки измерений по методике ГОСТ Р ИСО 11554–2008

n	$\overline{W_s}$, Вт	s_{W_s} , Вт	ΔP
1	800,0	95,3	0,238
2	800,0	76,7	0,192
3	752,3	87,8	0,233
4	716,2	93,2	0,260
5	681,9	103,5	0,304
6	657,7	88,5	0,269
7	639,4	107,2	0,335
8	631,8	94,2	0,298
9	614,6	100,6	0,327
10	580,7	93,4	0,322
11	559,2	113,7	0,407
12	531,0	99,3	0,374
13	509,9	110,2	0,432
14	472,1	96,1	0,407
15	451,8	112,7	0,499
16	383,0	97,3	0,508
17	382,5	108,0	0,565
18	309,9	114,3	0,738
19	282,4	115,2	0,816
20	249,2	108,2	0,868
21	197,8	117,2	1,185
22	191,0	104,2	1,091

Вычисленные параметры полиномиальной регрессии удовлетворяют принципу наименьших квадратов по s_{Ws} : сумма квадратов отклонений эмпирических значений s_{Ws} из табл. 1 от рассчитанных по уравнению полиномиальной регрессии Rgs_{Ws} меньше, чем сумма квадратов их отклонений от любой другой кривой этого вида (рис. 5).

С увеличением среднего значения мощности $\overline{W}_s$ эмпирическое стандартное отклонение s_{Ws} уменьшается.

Для оценки достоверности аппроксимации вычислим коэффициент корреляции r , который отражает степень линейной зависимости между двумя множествами данных s_{Wsi} и Rgs_{Wsi} :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{22} (s_{Wsi} - \overline{s_{Ws}})(Rgs_{Wsi} - \overline{Rgs_{Ws}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{22} (s_{Wsi} - \overline{s_{Ws}})^2 \sum_{i=1}^{22} (Rgs_{Wsi} - \overline{Rgs_{Ws}})^2}}.$$

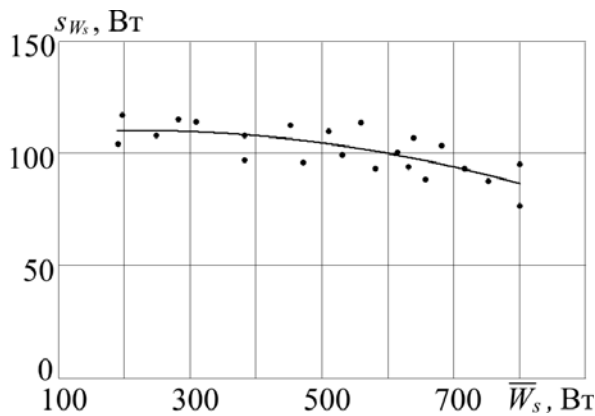


Рис. 5. Зависимость $s_{Ws}(\overline{W}_s)$ и кривая полиномиальной регрессии s_{Ws} на $\overline{W}_s$ (3)

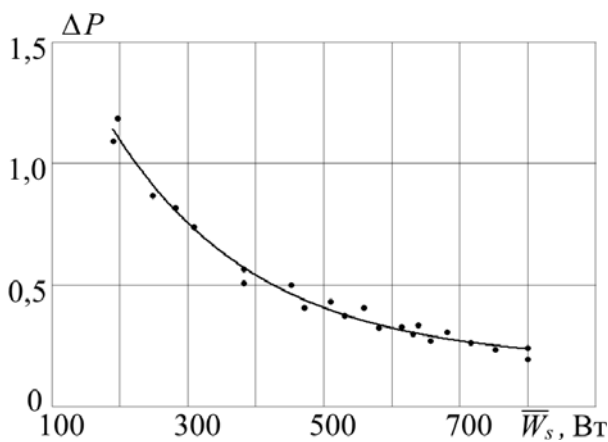


Рис. 6. Зависимость $\Delta P(\overline{W}_s)$ и кривая экспоненциальной регрессии ΔP на $\overline{W}_s$ (4)

Для расчета коэффициента корреляции воспользуемся функцией *corr* программы компьютерной математики *Mathcad 13*:

$$r = 0,7389, \quad r^2 = 0,5459.$$

Значение r^2 можно интерпретировать как отношение дисперсии для Rgs_{Wsi} к дисперсии для s_{Wsi}

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^{22} (Rgs_{Wsi} - \overline{Rgs_{Ws}})^2}{\sum_{i=1}^{22} (s_{Wsi} - \overline{s_{Ws}})^2} = 0,5459.$$

Чем ближе значение r^2 к единице, тем ближе значения регрессии к исходным эмпирическим значениям. В случае эмпирического стандартного отклонения s_{Ws} значение r^2 для регрессии Rgs_{Wsi} невелико. Это объясняется значительной дисперсией значений s_{Ws} , возможно из-за недостаточного времени усреднения мощности излучения ЛТК, которое составляет 2,5 мс.

Для аналитического представления зависимости $\Delta P = f(\overline{W}_s)$ применим экспоненциальную регрессию вида $y = a_1 e^{a_2 x} + a_3$. Для расчета коэффициентов регрессии воспользуемся функцией *expfit* программы компьютерной математики *Mathcad 13*. Уравнение экспоненциальной регрессии принимает вид

$$Rg\Delta P = 2,334e^{-4,679 \cdot 10^{-3} x} + 0,182. \quad (4)$$

Вычисленные параметры экспоненциальной регрессии удовлетворяют принципу наименьших квадратов по ΔP : сумма квадратов отклонений эмпирических значений ΔP из табл. 1 от рассчитанных по уравнению экспоненциальной регрессии $Rg\Delta P$ меньше, чем сумма квадратов их отклонений от любой другой кривой этого вида (рис. 6).

С увеличением среднего значения мощности $\overline{W}_s$ относительная флуктуация мощности ΔP экспоненциально уменьшается.

Для оценки достоверности аппроксимации вычислим коэффициент корреляции r^2 :

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^{22} (Rg\Delta P_i - \overline{Rg\Delta P})^2}{\sum_{i=1}^{22} (\Delta P_i - \overline{\Delta P})^2} = 0,9846.$$

Убывание относительной флуктуации мощности ΔP с ростом среднего значения мощности $\overline{W}_s$ достаточно точно описывается экспоненциальной регрессией $Rg\Delta P$.

Влияние амплитудного изменения мощности излучения ЛТК на его технологические возможности

Исследованные амплитудные изменения мощности лазерного излучения с частотой импульсов ионизации являются следствием способа организации тлеющего разряда и оказывают влияние на технологические возможности ЛТК с несамостоятельным тлеющим разрядом. Рассмотрим это влияние на примере лазерной резки алюминия.

Лазерная резка металлов с высокой отражающей способностью, таких как алюминий, медь, латунь, носит пороговый характер. Эти металлы имеют высокие коэффициенты отражения лазерного излучения в твердом состоянии, и для их первоначального плавления требуется значительная мощность. При плавлении коэффициент отражения металла падает, следовательно, для продолжения лазерной резки требуется меньшая мощность. Известен специальный технологический режим *CW with superpulses* («Непрерывный режим с наложенными импульсами») [9], когда на непрерывное излучение накладывается импульсное излучение для достижения порогового значения мощности, необходимого для первоначального плавления материала. Наличие амплитудных изменений мощности, превышающих ее среднее значение, позволяет предположить, что временные характеристики мощности излучения лазерного комплекса с НТР положительно повлияют на технологические параметры лазерной резки металлов с высоким коэффициентом отражения излучения.

Для проверки этого предположения на ла-

зерном комплексе с НТР «Лантан-5» был проведен технологический эксперимент по резке листа алюминиевого сплава системы AlCuMg1 Д16АТ [10]. Выбор этого сплава был обусловлен наличием данных о режимах резки таких сплавов ведущих мировых производителей лазерного оборудования фирм *PRC Laser Corp.* (США) и *Bystronic* (Швейцария) [11, 12].

Технологический режим резки алюминиевого сплава Д16АТ на лазерном комплексе «Лантан-5» имеет следующие параметры: мощность излучения ЛТК – 1700 Вт; фокусное расстояние линзы – 127 мм (5"); фокус на поверхности материала; диаметр сопла – 2 мм; расстояние от среза сопла до материала – 2 мм, технологический газ – воздух; давление – 8 атм. Данные о скорости резки сплава Д16АТ на комплексе «Лантан-5» и сравнительные данные фирм *PRC Laser Corp.* (лазер *PRC GL 2000*, мощность излучения – 2000 Вт) и *Bystronic* (лазер *Bylaser 1800*, мощность излучения – 1800 Вт) приведены в табл. 2.

При толщинах листа 1–1,5 мм скорости резки на комплексе «Лантан-5» превосходят, при толщинах 2–3 мм – сравниваются, а при толщине 4 мм – отстают от сравнительных данных компаний *PRC Laser Corp.* и *Bystronic* (рис. 7). При этом мощность излучения лазера «Лантан-5» на 5,5 % меньше, чем мощность лазера *Bylaser 1800* и на 15 % меньше мощности лазера *PRC GL 2000*. Скорость резки алюминиевого сплава толщиной 1 мм на комплексе «Лантан-5» на 20 % больше, чем скорость резки на комплексе фирмы *Bystronic* и на 52 % больше, чем скорость резки на комплексе компании *PRC Laser Corp.* При толщине листа 1,5 мм превышение по скорости составляет

Таблица 2

Скорость резки алюминиевого сплава Д16АТ

Толщина листа, мм	Скорость резки, мм/мин		
	ЛТК «Лантан-5», 1700 Вт	<i>PRC Laser Corp.</i> (США), <i>PRC GL 2000</i> , 2000 Вт	<i>Bystronic</i> (Швейцария), <i>Bylaser 1800</i> , 1800 Вт
1,0	8400	5537	7000
1,5	5400	4166	–
2,0	3300	3073	3500
2,5	1800	–	2000
3,0	1500	1575	1500
3,5	1140	–	–
4,0	540	889	1000

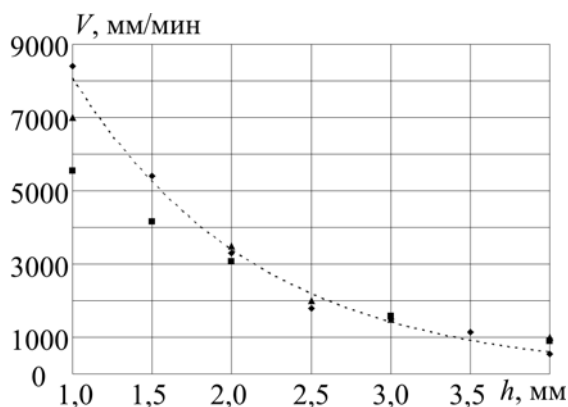


Рис. 7. Зависимость скорости резки V сплава Д16АТ от толщины материала h :
♦ – ЛТК «Лантан-5»; ■ – PRC GL 2000;
▲ – Bylaser 1800; - - - - аппроксимирующая кривая для ЛТК «Лантан-5»

30 %. Близкие данные по скорости резки при толщинах 2–3 мм и отставание при толщине листа 4 мм можно объяснить необходимостью более тщательного подбора технологических режимов лазерной резки, что значительно усложняло эксперимент и не являлось целью данной работы. Лучшие результаты при резке толстых (>3 мм) материалов можно получить, увеличивая давление технологического газа.

Скорость лазерной резки зависит от мощности излучения и его качества, определяемого дифракционным параметром M^2 [13]. Идеальное излучение имеет гауссово распределение плотности мощности по сечению лазерного пучка. В этом случае $M^2 = 1$. Чем ближе к единице параметр M^2 реального излучения, тем лучше его качество. Для лазера «Лантан-5» $M^2 = 1,6$ [14], а для лазеров PRC GL 2000 и Bylaser 1800 $M^2 = 2$, поэтому можно утверждать, что лазер «Лантан-5» имеет более качественное излучение и лучшие технологические возможности (скорости резки и толщины обрабатываемых материалов) по сравнению с иностранными аналогами [15].

На основании изложенного выше можно сделать вывод о том, что наличие амплитудного изменения мощности излучения ЛТК с частотой импульсов ионизации, наряду с высоким качеством излучения, расширяет технологические возможности ЛТК с НТР, позволяя увеличить скорость резки материалов с высоким коэффициентом отражения. Особенно важно 30–50 %-ное увеличение скорости лазерной резки тонких (1–1,5 мм) материалов, так как

для скоростной резки тонких материалов не существует альтернативной технологии, в то время как при резке более толстых материалов, в некоторых случаях, можно применить плазменную или гидроабразивную резку.

Заключение

В работе исследованы амплитудные изменения мощности лазерного излучения, определяемые способом управления мощностью излучения путем изменения частоты импульсов ионизации.

Рассмотренный способ управления наряду с высоким качеством излучения расширяет технологические возможности лазерного технологического комплекса с несамостоятельным тлеющим разрядом, позволяя увеличить скорость резки материалов с высоким коэффициентом отражения. В частности, при лазерной резке алюминиевого сплава Д16АТ толщиной 1–1,5 мм достигнуто 30–50 % увеличение скорости резки.

Полученные результаты могут быть применены в машиностроении при создании усовершенствованных систем управления технологическими лазерами.

Список литературы

1. Голубев В.С., Лебедев Ф.В. Физические основы технологических лазеров. – М.: Высшая школа, 1987. – 190 с.
2. Шемякин А.Н., Рачков М.Ю. Выбор способа управления мощностью излучения лазерного технологического комплекса с несамостоятельным тлеющим разрядом // Известия МГИУ. 2009. № 3 (16). С. 25–31.
3. Технологический лазер «Лантан-3» / О.М. Бойцов, В.М. Верин, Н.А. Генералов и др. – М.: ИПМ АН СССР, 1989. Препринт № 407. – 38 с.
4. Термoeлектрическое зеркало-приемник лазерного излучения / В.Н. Глебов, В.М. Мананков и др. // Известия РАН. Серия физическая. 1993. Т. 57. № 12. С. 167–169.
5. Шемякин А.Н., Рачков М.Ю., Якимов М.Ю. Измерение мощности лазерного излучения технологического комплекса с несамостоятельным тлеющим разрядом // Машиностроение и инженерное образование. 2009. № 2 (19). С. 22–29.
6. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 192 с.

7. ГОСТ Р ИСО 11554 – 2008. Оптика и фотоника. Методы испытаний лазеров и измерений мощности, энергии и временных характеристик лазерного пучка. – М.: Стандартинформ, 2008. – 13 с.
8. Дьяконов В.П. Mathcad 11/12/13 в математике: справочник. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 958 с.
9. Schwarzenbach A.P., Hunziker U.W. Industrial CO₂ laser with high overall efficiency // High Power CO₂ Laser Systems and Applications: Proc. SPIE, 1988. Vol. 1020. P. 43–48.
10. ГОСТ 4784–97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. – 11 с.
11. Лазерная резка. Источники лазерного излучения. – Режим доступа: http://www.bystronic.ru/cutting_and_bending/ru/ru/products/laser/bylaser/index.php (дата обращения: 21.12.2010).
12. Cut Calculator. – Режим доступа: <http://www.prclaser.com/calculator.shtml> (дата обращения: 21.12.2010).
13. International Standard ISO/DIS 11146. Optics and optical instruments, Lasers and laser related equipment, test methods for laser beam parameters: Beam widths, divergence angle and beam propagation factor. – 1995.
14. Power CO₂ laser with VRM unstable resonator: beam quality control and characterization / N.A. Generalov, N.G. Solov'yov, M.Yu. Yakimov et al. // Progress in R&D of High-Power Industrial CO₂ Lasers. Proc. SPIE, 2000 / ed.: V.Ya. Panchenko, V.S. Golubev. Vol. 4165. P. 210–218.
15. Получение и применение высококачественных негауссовых пучков мощных технологических CO₂-лазеров / Н.А. Генералов, М.И. Горбуленко, В.П. Зимаков и др. // Известия РАН. Серия физическая. 1997. Т. 61. № 8. С. 1554–1559.

Материал поступил в редакцию 18.09.2010

ШЕМЯКИН

Андрей Николаевич

E-mail: shemyakin@lantanlaser.ru
Тел. +7 (495) 433-76-77

Научный сотрудник лаборатории лазерных разрядов Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН. Член Коллегии национальных экспертов стран СНГ по лазерам и лазерным технологиям. Сфера научных интересов – автоматизация научных экспериментов, приборов и лазерного технологического оборудования. Автор 19 научных работ и 8 изобретений.

РАЧКОВ

Михаил Юрьевич

E-mail: michyur@gmail.com
Тел. +7 (499) 764-10-59

Доктор технических наук, профессор, академик Российской академии космонавтики. Секретарь Российского мониторингового комитета Европейской федерации национальных инженерных ассоциаций. Сфера научных интересов – автоматизация, робототехника и измерительные системы. Член Учебно-методического совета по автоматизации машиностроения Минобрнауки РФ. Член редколлегии научно-технического журнала «Мехатроника, автоматизация, управление». Автор более 270 работ, в том числе 13 книг и более 60 изобретений. Монографии по роботам вертикального перемещения и по автоматизации разминирования имеют мировой приоритет в этих направлениях.

СОЛОВЬЕВ

Николай Германович

E-mail: Solovyov@lantanlaser.ru
Тел. +7 (495) 433-76-77

Доктор физико-математических наук. Заведующий лабораторией лазерных разрядов Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН. Член Коллегии национальных экспертов стран СНГ по лазерам и лазерным технологиям. Сфера научных интересов – физика плазмы, газовые лазеры, лазерные технологии. Автор 68 научных трудов.