

# Сверление и резка тонких металлических пластин в воде излучением импульсно-периодического Nd:YAG-лазера

А.Ф.Глова, А.Ю.Лысиков

*Проведены экспериментальные исследования условий сверления и резки в воде металлических пластин из титана и нержавеющей стали толщиной 0.15 мм излучением импульсно-периодического Nd:YAG-лазера средней мощностью до 30 Вт в отсутствие водяной и газовой струи. Получены зависимости максимальной скорости резки в воде от мощности излучения, определена эффективность резки и проведено сравнение с условиями сверления и резки пластин на воздухе.*

**Ключевые слова:** лазерная резка и сварка, мощность излучения, нагрев, теплоотдача, эффективность.

## 1. Введение

Лазерная резка и сварка металлических конструкций в воде становится одним из перспективных направлений развития лазерной термической технологии. Использование оптического волокна позволяет достаточно просто транспортировать излучение к месту взаимодействия и проводить такие технологические операции, как, например, разделка для последующей утилизации или текущий ремонт корпусов судов.

Для повышения эффективности процессов лазерной резки и сварки металлов в воде и улучшения качества сварного шва и реза применяется водяная или газовая струя, направленная в область локализации фокального пятна на поверхности металла, действие которой приводит либо к устранению дефокусировки пучка из-за рефракции на газовых пузырьках при удалении пузырьков из области взаимодействия (водяная струя) [1], либо к созданию локального осушенного объема (газовая струя) [2–4]. При локальной осушке газовой струей эффективность лазерной резки и сварки металлов в воде достаточно высока. Так, в работах [2–4] эти операции выполнены с металлическими пластинами толщиной ~ 10 мм при использовании передаваемого по оптическому волокну излучения непрерывного Nd:YAG-лазера (мощность 4 кВт) и кислородно-иодного лазера (мощность до 7 кВт).

Если подача водяной или газовой струи в область взаимодействия нецелесообразна или затруднена, резку или сварку металлических конструкций лазерным излучением в воде приходится проводить в отсутствие струи. При этом из-за увеличения скорости локального отвода тепла от погруженных в воду конструкций следует ожидать повышения энергетических затрат на их обработку по сравнению с обработкой на воздухе.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование в отсутствие водяной и газовой струи условий сверления и резки в воде металлических пластин из титана и нержавеющей стали толщиной 0.15 мм излучением импульсно-периодического Nd:YAG-лазера со средней выходной мощностью до 30 Вт и сравнение полученных результатов с результатами сверления и резки на воздухе в отсутствие водной среды.

## 2. Эксперимент

Металлические пластины из титана и нержавеющей стали (X18H10T) размером 1.5×3 см и толщиной  $h = 0.13$  и 0.15 мм соответственно располагались вертикально при облучении на воздухе и горизонтально при облучении в воде и ориентировались перпендикулярно направлению распространения излучения. Обнаружено, что условия сверления и резки, а также форма отверстия и реза при обработке на воздухе не зависят от ориентации пластины; выбор вертикального расположения связан с удобством определения времени сверления. Изменение направления распространения горизонтального выходного лазерного пучка на вертикальное при обработке в воде осуществлялось с помощью поворотного зеркала, установленного по ходу пучка за фокусирующей линзой. При обработке в воде пластины крепились в металлической кювете, заполненной дистиллированной водой. Толщина слоя воды, покрывающего обращенную к излучению поверхность пластины, составляла ~ 2 мм; для тыльной стороны пластины она равнялась 10 мм.

В качестве источника излучения использовался импульсно-периодический Nd:YAG-лазер с длительностью импульса излучения на полувысоте  $\tau = 130$  мкс и с варьируемыми частотой повторения импульсов и мощностью накачки. Размер  $d$  фокального пятна сфокусированного на поверхность пластины многомодового излучения зависел от условий работы лазера и при неизменном фокусном расстоянии фокусирующей линзы составлял 0.22 или 0.3 мм, что соответствует условию облучения термически тонких пластин ( $d/h > 1$ ).

Время образования отверстия при облучении неподвижной пластины на воздухе определялось в момент появления светящихся искр с тыльной стороны пластины, а

А.Ф. Глова, А.Ю. Лысиков. ФГУП «ГНЦ РФ – Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Россия, 142190 Троицк, Московская обл., ул. Пушкиных, владение 12; e-mail: afglova@triniti.ru, lysikov@triniti.ru

Поступила в редакцию 3 июня 2011 г., после доработки – 16 сентября 2011 г.

при облучении в воде – из последующей визуализации с помощью оптического микроскопа массива областей воздействия излучения, полученных за разное время облучения. В обоих случаях точность определения времени составляла  $\pm 0.5$  с. Метод визуализации применялся и для определения характера области взаимодействия при движении мишени, в качестве которого выделялись сквозное и поверхностное плавление пластины, перфорированный рез и сплошной рез. Скорость перемещения образцов  $v$  не превышала 0.2 мм/с и могла изменяться с точностью 0.005 мм/с. При облучении пластины в воде неподвижная относительно кюветы пластина перемещалась вместе с кюветой.

При облучении в воде как неподвижной, так и движущейся пластины практически при всех режимах облучения наблюдалось интенсивное кипение прилегающего к фокальному пятну объема воды с выходом газовых пузырьков на поверхность и их симметричное распространение в воде в радиальном направлении в сторону от оси пучка. Во избежание конденсации пара на поверхности поворотного зеркала и изменения условий фокусировки излучения, вертикально направленный поток пара сдувался вспомогательной горизонтальной струей воздуха, не взаимодействующей с поверхностью воды.

### 3. Результаты и их обсуждение

#### 3.1. Сверление пластин

На рис.1 приведены зависимости времени появления сквозного отверстия  $t_0$  в пластинах из титана и нержавеющей стали при  $v = 0$  от средней мощности  $P$  сфокусированного на поверхность пластин лазерного излучения. Из-за малой толщины слоя воды ( $\sim 2$  мм) с фронтальной стороны пластины поглощением излучения в воде можно пренебречь [5]. При облучении пластин на воздухе вблизи поверхности возникает оптический разряд. Поглощением излучения в плазме разряда также пренебрегалось из-за малости коэффициента поглощения [6] и небольшой (не более 10 мм) длины разряда вдоль луча. Таким образом, величина мощности  $P$  на рис.1 (и на последующих рисунках) равна выходной мощности, ослабленной с учетом поглощения излучения фокусирующей линзой или линзой и поворотным зеркалом. Как следует из рис.1, при фиксированной мощности время сверления  $t_0$  на воздухе с увеличением частоты повторения импульсов  $f$  увеличивается (кривые 1, 2), возрастает для пластины из нержа-

вующей стали по сравнению с титаном (кривые 2, 3), а при сверлении в воде заметно превосходит время сверления без воды (кривые 2, 4).

Отмеченные особенности в случае сверления на воздухе связаны с уменьшением давления паров металла при уменьшении флуктуирующей температуры  $\delta T$  в приповерхностном слое пластины [7] с увеличением  $f$  и коэффициента теплопроводности нержавеющей стали по отношению к титану при близкой толщине пластин, примерно одинаковом коэффициенте поглощения излучения и неизменной средней мощности:  $\delta T = 2AP/(f\tau\lambda)(\chi t_1/\pi)^{1/2}$ ,  $t_1 < \tau$  (здесь  $A$  – коэффициент поглощения излучения,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $s = \pi d^2/4$  – площадь фокального пятна,  $\chi$  – коэффициент теплопроводности).

Увеличение  $t_0$  при переходе к сверлению в воде можно объяснить увеличением теплоотдачи в воде. Сравним для этого два канала потерь мощности лазерного излучения: на теплоотдачу с двух противоположных участков пластины площадью  $S$ , примерно одинаково нагретых на величину средней температуры  $\Delta T$ ,  $Q_1 \approx 2\alpha S\Delta T$  (здесь  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи) и на поперечную теплопроводность  $Q_2 \approx 2\pi h\lambda\Delta T$ , где  $h$  – толщина пластины. Пренебрежем длиной тепловой волны  $l \sim (\chi\tau)^{1/2} \approx 2 \times 10^{-3}$  см для титана по сравнению с радиусом фокального пятна и примем  $S \approx s$ . В сделанных предположениях отношение  $Q_1/Q_2 \approx \alpha d^2/(4\lambda h)$ . Для пластины в воздухе коэффициент теплоотдачи можно оценить по выражению  $\alpha = \lambda_a(g/(dh^2))^{1/4}$  [8] (здесь  $\lambda_a$ ,  $\eta$  – коэффициент теплопроводности и кинематической вязкости воздуха соответственно,  $g$  – ускорение свободного падения), тогда находим  $Q_1/Q_2 \approx 3 \times 10^{-3}$ . Теплоотдача при пленочном кипении в воде также мала ( $Q_1/Q_2 \sim 10^{-2}$ ), несмотря на почти трехкратное увеличение коэффициента теплоотдачи [9]. Можно предположить, что заметное увеличение времени при сверлении пластины в воде по сравнению с временем при сверлении на воздухе происходит из-за смешанного режима кипения: пленочного при воздействии импульса излучения, когда флуктуирующая температура  $\delta T$  превосходит критическую температуру начала пленочного кипения, и пузырькового кипения в паузе между импульсами, когда средняя температура меньше  $\delta T$ . Коэффициент теплоотдачи при пузырьковом кипении заметно выше, чем при пленочном кипении, особенно в условиях импульсного нагрева, когда расположенные на поверхности газовые пузырьки не успевают отрываться от поверхности [10, 11]. Динамика движения пузырьков при нагреве поверхности импульсным лазерным излучением, представляющая интерес с точки зрения изменения теплоотдачи, исследовалась, например, в работах [11, 12]. Для определения среднего коэффициента теплоотдачи в случае предполагаемого в данных экспериментах смешанного режима кипения необходимы отдельные экспериментальные и численные исследования. Поэтому можно лишь отметить, что интенсивная теплоотдача при пузырьковом кипении в паузе между импульсами способна, наряду с рефракцией лазерного излучения на газовых пузырьках, также приводить к заметному увеличению времени сверления пластин в воде по сравнению с временем сверления на воздухе.

Рельеф поверхности в пределах фокального пятна и прилегающей к нему внешней области при облучении пластин в воде заметно отличается от рельефа при облучении на воздухе. При небольшой средней мощности излучения лазера можно проследить эволюцию рельефа на достаточно больших временных интервалах.

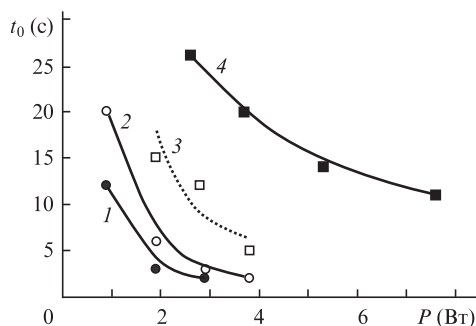


Рис.1. Зависимости времени формирования отверстия  $t_0$  от средней мощности излучения  $P$  при сверлении пластин на воздухе (1–3) и в воде (4) для титана (1, 2, 4) и нержавеющей стали (3). Диаметр фокального пятна  $d = 0.22$  мм, частота повторения импульсов  $f = 50$  (1) и 100 Гц (2–4).

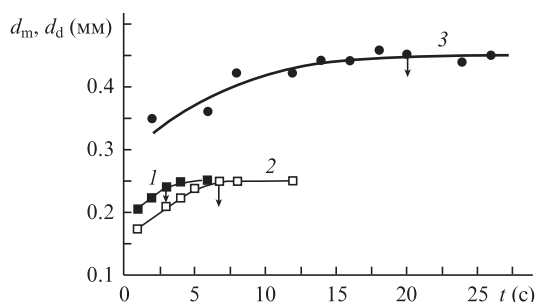


Рис.2. Зависимости диаметра расплава  $d_m$  при сверлении на воздухе (1, 2) и занятой каплями области  $d_d$  при сверлении в воде (3) от времени облучения  $t$  для титана при  $d = 0.22$  мм ( $f = 50$  (1) и 100 Гц (2, 3) и  $P = 1.9$  (1, 2) и 3.5 Вт (3)). Стрелками показано время появления отверстия.

В случае воздуха эволюция рельефа аналогична описанной ранее (см., напр., [13, 14]) и подробно не обсуждается. Отметим только, что после формирования отверстия рост диаметра  $d_m$  оставшейся периферийной части расплава с течением времени замедляется, затем прекращается и  $d_m$  лишь немного превышает размер отверстия, который становится равным диаметру  $d$  фокального пятна (рис.2, кривые 1, 2).

При облучении в воде на внешней границе зоны термического воздействия отсутствует характерный подъем в виде валика застывшего металла, возникающий на воздухе из-за термокапиллярной конвекции. Это может быть связано с действием поперечной силы давления паров воды в сверхкритическом состоянии, намного превышающей силу поверхностного натяжения. Вместо сплошного расплава, на периферии фокального пятна появляется область в виде капель застывшего металла размером  $\sim 20$  мкм, равномерно распределенных на более темной оксидной пленке, причем диаметр этой области  $d_d$  заметно превышает  $d$  (рис.2, кривая 3). Появление капель можно связать с фрагментацией выдавливаемого пара расплава на границе с окружающей средой из-за развития рэлей-тэйлоровской неустойчивости, вытеснением фрагментов на периферию поперечным давлением паров и далее их осаждением в виде капель на поверхности с увеличенным (по сравнению с  $d$ ) размером. Характерный радиус капель  $R$  можно оценить из условия равенства лапласова давления  $p$  остывающей капли и атмосферного давления,  $R = 2\sigma/p$ , где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения. Оценка для титана дает  $R \approx 30$  мкм, что неплохо согласуется с визуальными наблюдениями. Аналогичный механизм образования капель справедлив и для воздуха. Однако из-за большой скорости торможения капель в воде [1] длина их разлета резко уменьшается, и осаждение происходит вблизи фокального пятна. После образования отверстия размер занятой каплями области не зависит от времени. Это связано с тем, что при уже существующем отверстии диаметром порядка  $d$  новых капель в последующие моменты времени не возникает, и размер области определяется каплями, осажденными в предыдущие моменты времени.

### 3.2. Резка пластин

На рис.3 приведены фотографии поверхности фронтальной стороны движущейся в воздухе титановой пластины, иллюстрирующие различный вид поверхности после взаимодействия с излучением в зависимости от скоро-

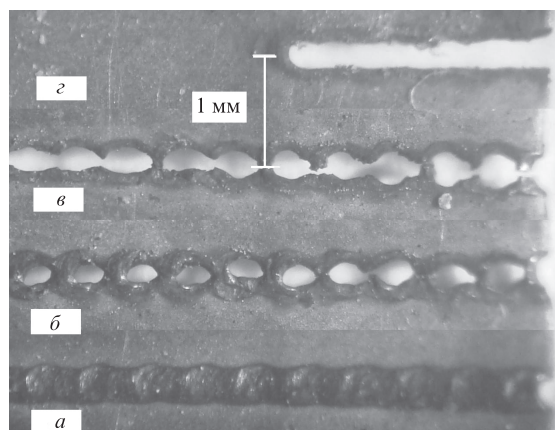


Рис.3. Фотографии дорожек на поверхности для движущейся в воздухе титановой пластины при  $d = 0.22$  мм,  $P = 4$  Вт,  $f = 50$  Гц и  $v = 0.2$  (а), 0.14 (б), 0.09 (в) и 0.02 мм/с (г).

сти движения. Направление движения на рисунке соответствует перемещению фокального пятна к правому краю пластины. По мере уменьшения скорости режим поверхностного (или сквозного) проплавления (рис.3,а) переходит в режим периодической (перфорированной) резки, при котором область воздействия представляет собой почти периодическую последовательность отверстий примерно одинакового размера (рис.3,б), и при дальнейшем уменьшении скорости перфорированный рез сменяется сплошным резом (рис.3,г). Между перфорированной и сплошной резкой существует переходный режим, когда из нескольких отверстий формируется фрагмент сплошного реза (рис.3,в). Переходный режим возникает и между плавлением и периодической резкой. В этом режиме отверстия с различающимися формой и размерами располагаются нерегулярно вдоль направления движения. Аналогичная смена режимов наблюдается и при постоянной скорости и варьируемой мощности излучения. Неустойчивость резки, свойственная переходным режимам, легко воспроизводится и имеет, по-видимому, общую природу с аналогичной неустойчивостью при дистанционной резке металлов, описанной в работе [15].

Смена режимов обработки происходит и при облучении движущихся пластин в воде (рис.4). Подбирая скорость движения или мощность излучения, можно, как и при облучении на воздухе, управлять не только шириной сплошного реза, но и параметрами перфорированного реза. В качестве примера в табл.1 приведены зависимости пространственного периода  $T$  отверстий перфорированного реза в воде в зависимости от скорости и мощности излучения.

При облучении на воздухе и в воде вид дорожек качественно различается. При облучении в воде дорожки покрыты каплями застывшего металла. Ширина дорожек  $d_p$ , как и диаметр занятой каплями области  $d_d$  при сверлении неподвижных пластин, заметно превосходит диаметр фокального пятна и при увеличении скорости уменьшается (рис.5). Уменьшение  $d_p$  в зависимости от  $v$  происходит, вероятно, из-за уменьшения локальной температуры поверхности при увеличении скорости, вследствие чего и поперечное давление паров, вытесняющее капли на периферию, становится меньше.

Сравним эффективность обработки пластин на воздухе и в воде. Интерес представляет эффективность сплошной резки и периодической резки как разновидности раз-

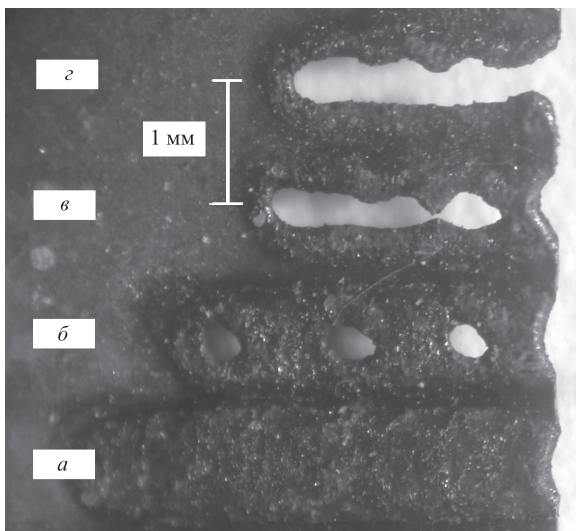


Рис.4. Фотографии дорожек на поверхности для движущейся в воде титановой пластины при  $d = 0.3$  мм,  $P = 15.6$  Вт,  $f = 50$  Гц и  $v = 0.06$  (а), 0.05 (б), 0.04 (в) и 0.03 мм/с (з).

Табл.1. Зависимости от  $v$  и  $P$  пространственного периода  $T$  отверстий периодического реза в воде для титана при  $d = 0.3$  мм и  $f = 50$  Гц.

$T$ (мм)	$v$ (мм/с)	$P$ (Вт)
0.7	0.04	18.6
0.87	0.05	18.6
0.91	0.065	18.6
1	0.03	6.9
0.75	0.02	13.8
0.7	0.04	18.6

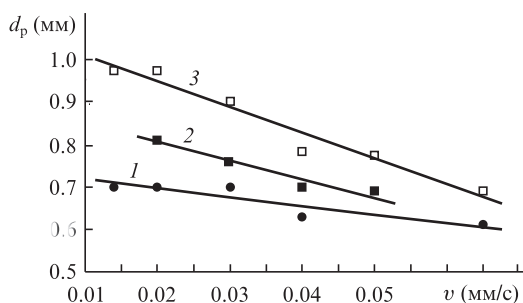


Рис.5. Зависимости ширины дорожек  $d_p$  от скорости  $v$  при облучении титановой пластины в воде ( $d = 0.3$  мм,  $f = 50$  Гц,  $P = 6.7$  (1), 13.8 (2) и 19.7 Вт (3)).

мерной обработки материалов лазерным излучением. На рис.6 представлены зависимости от  $P$  максимальной скорости движения мишени в воздухе  $v^{max}$ , при которой еще существует рез и устойчивый перфорированный рез, для титана и нержавеющей стали при  $f = 50$  и 100 Гц. Аналогичные зависимости при обработке в воде при  $f = 50$  Гц приведены на рис.7. Из представленных на рис.6, 7 зависимостей видно, что максимальные значения скорости при заданной мощности и частоте для стали меньше, чем для титана, и при увеличении частоты уменьшаются. Как и в случае сверления пластин, эти особенности качественно объясняются разной теплопроводностью материалов и изменением энергии в импульсе при постоянной средней мощности и изменении частоты. Удобным количественным критерием эффективности сплошной резки служит параметр  $\beta = v^{max}(P/h)^{-1}$  [7], равный площади разреза, приходящейся на единицу затрачиваемой энергии. Так,

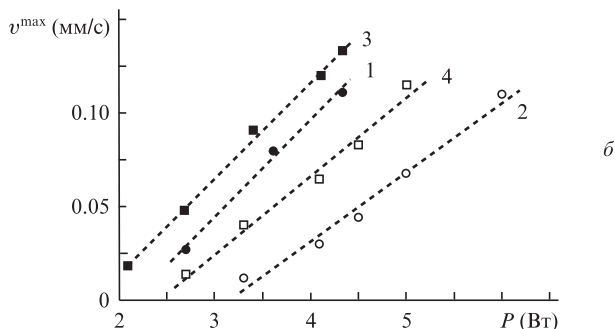
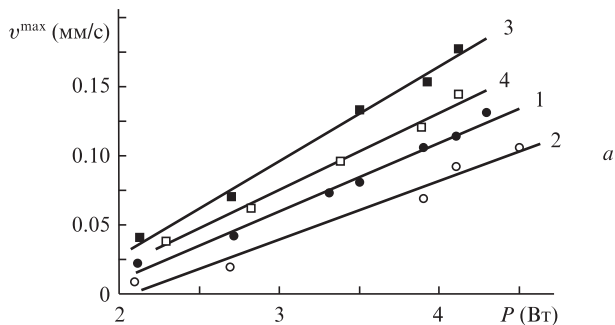


Рис.6. Зависимости от  $P$  максимальной скорости  $v^{max}$  устойчивого реза (1, 2) и устойчивого периодического реза (3, 4) на воздухе для титана (а) и нержавеющей стали (б) при  $d = 0.22$  мм и  $f = 50$  (1, 3) и 100 Гц (2, 4).

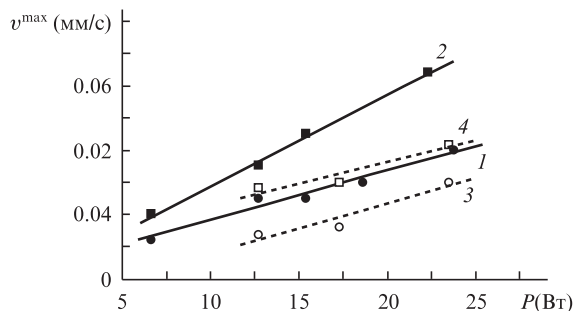


Рис.7. Зависимости от  $P$  максимальной скорости  $v^{max}$  устойчивого реза (1, 3) и устойчивого периодического реза (2, 4) в воде для титана (1, 2) и нержавеющей стали (3, 4) при  $d = 0.3$  мм и  $f = 50$  Гц.

для титана при  $f = 50$  Гц  $\beta$  на воздухе и в воде равен соответственно  $\sim 3.8$  и  $\sim 0.3$  мм<sup>2</sup>/кДж и слабо зависит от  $P$  из-за линейного характера зависимостей  $v^{max}$  от  $P$  в приведенных на рис.6 и 7 диапазонах изменения мощности. Как видно из рисунков, при переходе к резке в воде эффективность процесса снижается, однако не настолько, чтобы можно было говорить о чрезмерно низкой эффективности. Например, значение  $\beta \approx 0.5$  мм<sup>2</sup>/кДж типично для технологии дистанционной резки металлов на воздухе излучением непрерывного CO<sub>2</sub>-лазера [7]. Ввести количественный критерий эффективности, аналогичный  $\beta$ , для перфорированной резки затруднительно, однако и для этого вида обработки уменьшение скорости обработки в воде по сравнению с воздухом по порядку величины такое же, как и при сплошной резке.

#### 4. Заключение

Проведенные исследования показали, что при облучении термически тонких металлических пластин в воде

импульсно-периодическим лазерным излучением в отсутствие водяной и газовой струи возможно контролируемое управление режимами резки при достаточно высокой эффективности. Увеличение времени сверления пластин и уменьшение скорости их резки в воде, по сравнению с аналогичной обработкой на воздухе при одинаковой средней мощности, можно объяснить интенсивной теплоотдачей в режиме пузырькового кипения. При обработке в воде прилегающие к зоне термического воздействия участки поверхности, покрытые каплями застывшего металла, по своим размерам заметно превосходят размеры зоны воздействия. Осаждение капель влияет на качество обработки и должно учитываться в случае прецизионной обработки материалов в воде и других жидкостях требует постановки новых практических задач и развития работ в данном направлении.

Авторы выражают благодарность М.М.Смакотину за помощь при подготовке экспериментов и Г.Г.Гладушу за обсуждение результатов.

1. Арзуов М.И., Джумабеков Ж.И., Конов В.И., Ральченко В.Г., Силенок А.С., Чаплиев Н.И. *Физика и химия обработки материалов*, № 3, 136 (1989).
2. Okado H., Sakurai T., Adachi J., Miyao H., Hara K. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3887**, 152 (2000).
3. Chida I., Okazaki K., Shima S., Kurihara K., Yuduchi Y., Sato I. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4831**, 453 (2003).
4. Zhang X., Ashida E., Shono S., Matsuda F. *J. Mater. Process. Technol.*, **174**, 34 (2006).
5. Криксунов Л.З. *Справочник по основам инфракрасной техники* (М.: Сов. радио, 1978).
6. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда* (М.: Наука, 1978).
7. Гладуш Г.Г., Дробязко С.В., Родионов Н.Б., Антонова Л.И., Сенаторов Ю.М. *Квантовая электроника*, **30**, 1072 (2000).
8. Гебхарт Б., Джамурия И., Махаджан Р., Самманья Б. *Свободно-конвективные течения, тепло- и массообмен* (М.: Мир, 1991).
9. Кутателадзе С.С. *Основы теории теплообмена* (М.: Атомиздат, 1979).
10. Антонова Л.И., Афанасьева Е.Ю., Дробязко С.В. и др. *Атомная энергия*, **92**, 103 (2002).
11. Антонова Л.И., Афанасьева Е.Ю., Глова А.Ф. и др. *Препринт ТРИНИТИ А-122* (М., ЦНИИАтоминформ, 2005).
12. Sasoh A., Watanabe K., Sano Y., Mukai N. *Appl. Phys. A*, **80**, 1497 (2005).
13. Веденов А.А., Гладуш Г.Г. *Физические процессы при лазерной обработке материалов* (М.: Энергоатомиздат, 1985).
14. Арутюнян Р.В., Баранов В.Ю., Большов Л.А., Малюта Д.Д., Себрант А.Ю. *Воздействие лазерного излучения на материалы* (М.: Наука, 1989).
15. Антонова Г.Ф., Гладуш Г.Г., Красюков А.Г., Косырев Ф.К., Родионов Н.Б. *ТВТ*, **38**, 501 (2000).