

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С МЕТАЛЛАМИ

А.Н. Глотов

aglotov@mail.ru

Ю.В. Голубенко

В.А. Десяцков

luwona@yandex.ru

А.В. Степанов

stepanov\_3@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Приведены результаты экспериментальных исследований в рамках задачи оптимизации эффективности взаимодействия лазерного излучения с металлами. В качестве источников требуемых излучений использованы разновидности Nd-лазеров с необходимым набором энергетических, временных и пространственных параметров излучений. Накачка лазеров осуществлена импульсами прямоугольной формы с периодичностью, которая исключает проявление эффектов, присущих непрерывным и частотным режимам работы лазеров, ограничив этим получаемые зависимости эффективности взаимодействия только параметрами лазерного излучения, соответствующими разовому режиму работы лазеров. Варьирование временных параметров излучения включало в себя проведение измерений в режимах свободной генерации, высокочастотной модуляции добротности, а также изменение длительности импульсов накачки (генерации). Вариации энергетических параметров реализованы изменением плотности энергии излучения на облучаемой поверхности. Изменение пространственной структуры аблирующего излучения выполнено с использованием оптических средств, а также разными лазерными излучателями. По результатам проведенных экспериментальных исследований установлены закономерности в эффективности взаимодействия лазерного излучения с металлами от его параметров

### Ключевые слова

*Лазерное излучение, высокочастотная модуляция добротности, плотность энергии излучения, поперечное распределение, абляционный процесс, эффективность взаимодействия*

Поступила 25.06.2019

Принята 04.07.2019

© Автор(ы), 2020

---

**Введение.** Процесс взаимодействия лазерного излучения с металлами весьма сложен и представляет собой совокупность таких физических процессов, как нагрев, плавление и испарение металла под действием лазерно-

го излучения; экранирование области воздействия пароплазменными образованиями, возникающими в результате разрушения материала; охлаждение аблируемой области металла за счет его теплопроводности и теплообмена с окружающей средой [1–3]. Как правило, на практике подобные техпроцессы реализуют с помощью лазеров, использующих импульсную накачку активных сред (АС), поскольку при этом проще получить требуемые значения энергетических и временных параметров излучения. В дополнение к этому высокая эффективность процесса сверления металлов достигается при использовании лазерного излучения с ярко выраженной пиковой структурой. Негативное влияние на эффективность указанного процесса оказывают высокая теплопроводность металлов и их высокие отражающие свойства; экранирование действующего излучения образующимися парами и каплями металла, а также плазмой [4, 5]. Следует отметить, что в работах [1–5] исследованы процессы прожигания каналов при диаметрах лазерных пучков не более 0,5 мм и ограниченном наборе варьируемых параметров излучения.

По результатам этих исследований реализованы два способа эффективного прожигания и резки металлов. Первый способ называется комбинированным [6–9], когда в техпроцессе используют излучения двух лазеров: один генерирует излучение в режиме свободной генерации при непрерывной или импульсной накачке, предназначенное для доведения аблируемой области металла до фазы плавления. Это наиболее энергозатратная часть технологической операции. Второй лазер генерирует импульсное излучение малой длительности и энергии, но большой импульсной мощности, достаточной для выплескивания образовавшегося расплава через парообразование.

Второй способ является развитием первого, но с использованием одного лазера [10–14]. Лазер работает в режиме высокочастотной модуляции добротности с  $F_m = 10^3 \dots 10^5$  Гц, в результате чего генерируемое излучение, представляющее собой периодическую последовательность мощных пиков, эффективно нагревает, плавит и удаляет металл из области воздействия.

**Постановка задачи.** Научно-практический интерес представляют исследования, ориентированные на прожигание (лазерное сверление) качественных микронных отверстий и каналов с большим аспектным числом (отношение длины канала к его поперечному размеру) [14]. При этом для реализации подобных техпроцессов рекомендовано использовать мощные импульсы наносекундной и меньшей длительности, когда процесс

абляции металла осуществляется только через стадию его испарения. Однако на практике существует спрос и на эффективное прожигание отверстий диаметром более 1 мм в листовых металлах. В настоящей работе приведены результаты исследований эффективности прожигания металлов излучением Nd-лазеров в зависимости от энергетических, временных и пространственных параметров излучения.

**Средства и методы выполнения экспериментальных исследований.**

Для проведения экспериментальных исследований использован лазер, состоящий из задающего генератора (ЗГ) и двухпроходового усилителя. В ЗГ использовалась АС ИЛФ:Nd, его генерация осуществлялась на  $\lambda = 1,053$  мкм, что соответствовало АС усилителя ГЛС-22 ( $\lambda = 1,055$  мкм). Для модуляции добротности в ЗГ использован акустооптический затвор (АОЗ) МЗ-323. В экспериментах модуляция осуществлялась на частотах  $F_m = 25...250$  кГц. Выбор ИЛФ:Nd в качестве АС ЗГ обусловлен более высокими усилительными характеристиками, чем неодимовое стекло — поперечные сечения вынужденных переходов  $\sigma$  этих АС равны  $1,2 \cdot 10^{-19}$  и  $3 \cdot 10^{-20}$  см<sup>2</sup> соответственно. Это позволяет при меньших значениях энергии накачки генерировать излучение с большей энергией, а в режиме высокочастотной модуляции добротности получать еще и более короткие и мощные пички излучения для расширения его возможностей в эксперименте.

Для возбуждения АС лазера использовалась ламповая накачка:

- для ИЛФ:Nd диаметром 5 мм и длиной  $l = 110$  мм лампа ИНП-5/90;
- для ГЛС-22 диаметром 8 мм и  $l = 130$  мм лампа ИНП-7/120.

Электрические контуры питания ламп формировали импульсы накачки квазипрямоугольной формы (рис. 1) длительностью около 3,0 мс по вершине. В результате при энергии излучения ЗГ, равной 5...6 Дж, в режиме модуляции добротности формировались пички излучения, длительность которых в зависимости от частоты модуляции приведена ниже:

$F_m$ , кГц.....	225	200	175	150	125	100	75	50
$\tau_i$ , нс .....	200	160–180	150–180	140–150	120–130	60–100	60–75	50

В результате анализа материалов, касающихся данной тематики, необходимо отметить важное влияние временной структуры излучения на эффективность абляционного воздействия. В связи с этим первые исследования касались рассмотрения зависимости абляционного процесса от временной структуры лазерного излучения. Такие измерения выполнялись для двух вариантов пространственного распределения излучения на облучаемой поверхности:

1) близкое к равномерному (вариант 1), реализуемое переносом уменьшенного изображения выходного торца активного элемента лазерного усилителя на поверхность металла;

2) с более интенсивной центральной областью пучка излучения, реализуемого в фокальной плоскости фокусирующей линзовой системы (вариант 2).

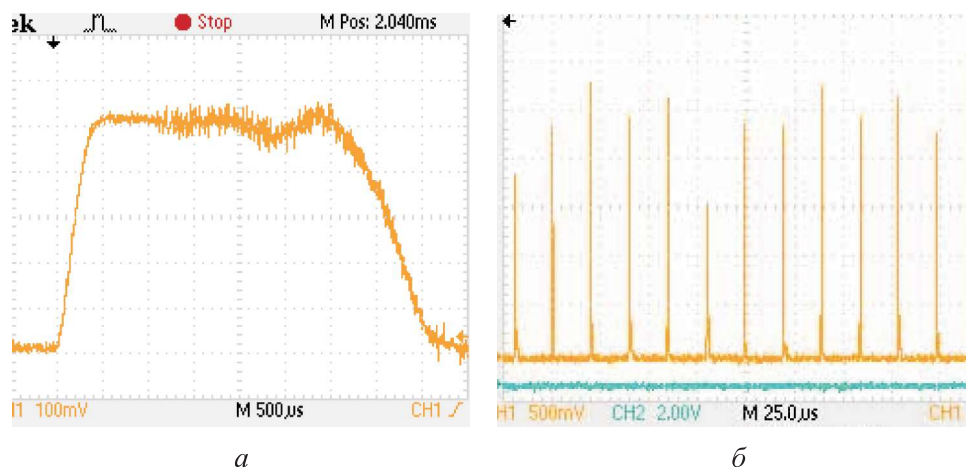


Рис. 1. Осциллограммы импульсов накачки (а) и излучения (б)

Разнообразию пространственного распределения излучений по варианту 2 осуществлялось с использованием еще двух схем лазерных излучателей. Для фокусировки излучения применена система, состоящая из двух тонких просветленных линз; изменяя расстояния между линзами, устанавливают требуемое эквивалентное фокусное расстояние  $f_{\text{экв}}$  системы и, соответственно, размер пятна на металле. В варианте 1 уменьшенное изображение строилось с использованием одной линзы.

Пространственное распределение излучения лазера с модуляцией добротности (вариант 2) представлено ниже (измерения выполнены при  $f_{\text{экв}} \approx 150$  см).

#### Пространственное распределение излучения

Диаметр измерительной диафрагмы, мм .....	1,05	1,50	2,2	$\infty$
Доля энергии излучения в диафрагме .....	0,59	0,74	0,89	1
Угловое значение измерительной диафрагмы, мрад .....	0,7	1,0	1,47	–

Все исследования по взаимодействию проведены при условии, что поперечный размер области воздействия  $d_{\text{п}}$  должен быть не меньше толщины листового металла. При проведении измерений с варьировани-

ем значения поверхностной плотности энергии излучения  $W_{\text{п}} = E_{\text{п}} / s_{\text{п}}$  ( $E_{\text{п}}$  — энергия излучения лазера за импульс накачки на поверхности металла;  $s_{\text{п}}$  — эффективное значение поперечного размера пятна излучения на поверхности металла) лазеры работали при постоянных значениях энергии накачки. Вследствие этого обеспечивалась относительная стабильность пространственно-временной структуры их излучения. В лазере с модуляцией добротности этим гарантировалась относительная стабильность энергии и длительности отдельных пиков излучения. Выбранной накачкой устанавливалась максимальная энергия лазерного излучения в экспериментах. При выполнении этого условия изменение плотности  $W_{\text{п}}$  осуществлялось ослаблением исходного (максимального) излучения с помощью полупрозрачных зеркал. Таким образом, значения энергии излучения  $E_{\text{п}}$  на облучаемой поверхности составляли 8,0, 12,5 и 18,0 Дж. На данном этапе исследований рассмотрено влияние на процесс абляции энергетических и временных параметров излучения, а также его пространственной структуры, не изменяемых термооптическими искажениями АС. Для этого период следования импульсов накачки лазера примерно равен 2,5 мин, что определялось временем релаксации термооптических искажений стеклянного активного элемента.

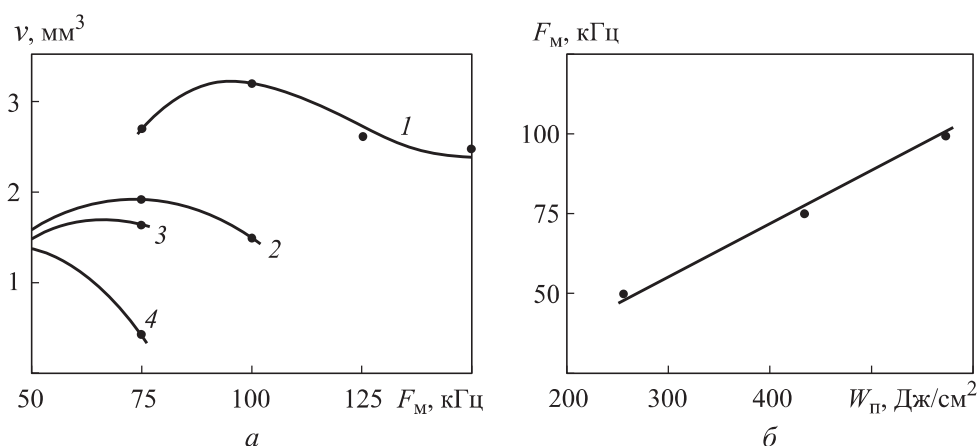
Поперечный размер пучка излучения на поверхности металла определялся по отпечатку от излучения на засвеченной фотобумаге. Площади  $s_{\text{п}}$  этих пятен использовались для определения плотности  $W_{\text{п}}$  при обработке результатов воздействия. Для вариантов 1 и 2 поперечная форма пучка излучения на поверхности металла определялась при максимальном значении его энергии (18 Дж). Таким образом, при работе с излучением в форме регулярной пиковой структуры, когда его энергия на поверхности металла принимала значения 8...18 Дж, величина  $s_{\text{п}}$  при обработке результатов воздействия полагалась неизменной.

**Результаты экспериментальных исследований.** Проведены исследования по прожиганию пластины из алюминиевого сплава Д16 толщиной 2 мм с двумя вариантами поперечных распределений излучения по сечению лазерного пучка. В результате установлено следующее.

1. В режиме модуляции добротности наблюдается явная зависимость результатов воздействия не только от плотности энергии излучения за импульс накачки  $W_{\text{п}}$ , но и от частоты  $F_{\text{м}}$  следования отдельных пиков излучения, составляющих генерацию. Измерения по варианту 1 выполнялись для  $d_{\text{п}} = 2,00; 2,30; 2,45; 2,75$  мм и  $E_{\text{п}} = 8; 12,5; 18$  Дж с изменением

$F_M = 50 \dots 250$  кГц. При варьировании  $F_M$  и постоянных значениях  $W_{II}$  изменяется не только глубина  $h$  образующегося в металле кратера, но и его поперечный размер, измеряемый на поверхности пластины ( $d_{вх}$ ).

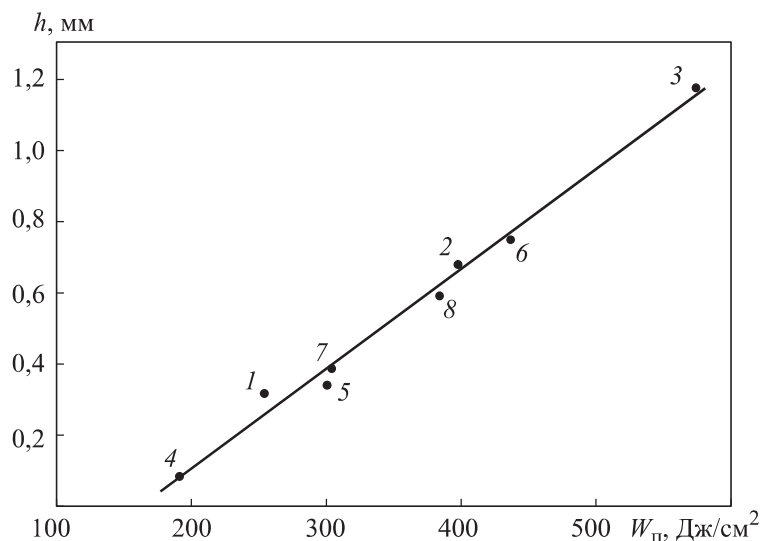
В качестве дополнительного критерия оценки эффективности воздействия введен параметр  $\nu = d_{вх}^2 h$ , подобный объему образующегося кратера. Частотная зависимость эффективности воздействия приведена на рис. 2. Для разных комбинаций величин  $d_{II}$  и  $E_{II}$  есть свои оптимальные значения  $F_M$ , при которых реализуются максимальные эффективности прожигания металла. При уменьшении  $W_{II}$  оптимальное значение периода следования пиков излучения  $1/F_M$  увеличивается, а их энергетика возрастает.



**Рис. 2.** Частотная зависимость эффективности прожигания алюминиевого сплава Д16 излучением Nd-лазера с модуляцией добротности (вариант 1,  $E_{II} = 18$  Дж) при  $W_{II} = 573$  (1), 434 (2), 382 (3), 255 Дж/см<sup>2</sup> (4) (а) и зависимость  $F_M$  ( $W_{II}$ ) при  $d_{II} = 2$  мм в режиме максимального прожигания алюминиевого сплава Д16 излучением лазера с модуляцией добротности (вариант 1) (б)

Зависимость глубины  $h$  кратера, образующегося под воздействием излучения лазера с модуляцией добротности, от плотности энергии  $W_{II}$  показана на рис. 3. Точки соответствуют разным комбинациям параметров  $d_{II}$  и  $E_{II}$  для значений частоты  $F_M$ , при которых получался лучший результат (оптимальные значения  $F_M$ ). Полученная зависимость  $h = f(W_{II})$  аппроксимируется прямой линией.

Анализ результатов воздействия по варианту 1 для разных значений  $d_{II}$  и  $E_{II}$  показывает, что при работе на  $F_M$  поверхностные плотности



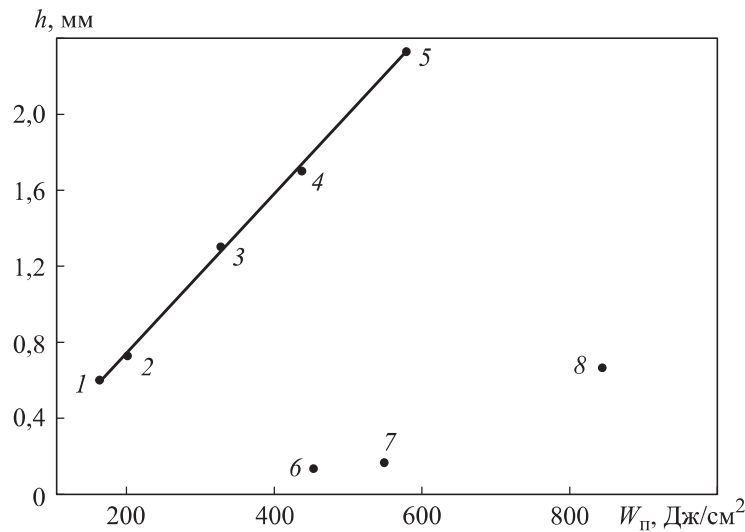
**Рис. 3.** Зависимость глубины  $h$  кратера от плотности энергии  $W_{\text{п}}$  при воздействии излучением лазера с модуляцией добротности по варианту 1:

$d_{\text{п}} = 2,0$  мм:  $E_{\text{п}} = 8$  (1), 12,5 (2) и 18 Дж (3);  $d_{\text{п}} = 2,3$  мм:  $E_{\text{п}} = 8$  (4), 12,5 (5) и 18 Дж (6);  
 $d_{\text{п}} = 2,45$  мм:  $E_{\text{пов}} = 18$  (7);  $d_{\text{п}} = 2,75$  мм:  $E_{\text{п}} = 18$  Дж (8)

энергии излучения для одиночных пичков  $W_{\text{п}i}$ , составляющих генерацию, примерно равны (независимо от комбинации параметров) и для сплава Д16  $W_{\text{п}i} \approx 2$  Дж/см<sup>2</sup>. При этом объем удаляемого металла пичком излучения  $\Delta v_i$  также примерно одинаков.

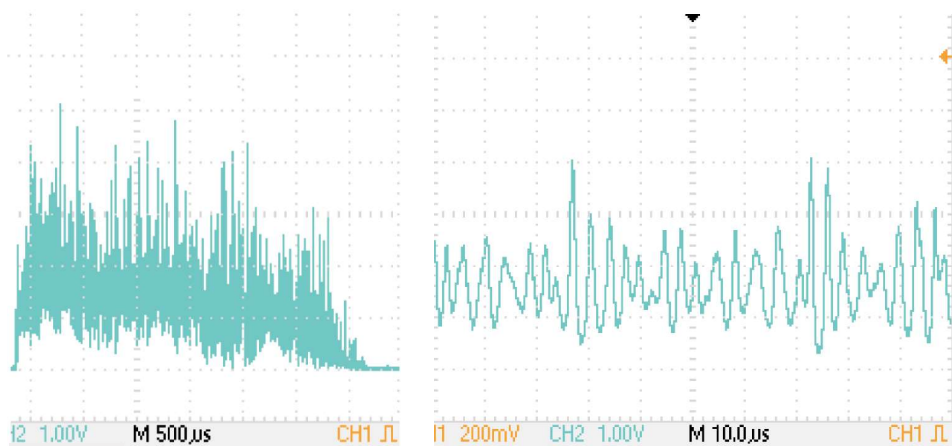
2. В эксперименте с фокусировкой излучения (вариант 2) размер пятна и энергия на пластине при использовании лазера с модуляцией добротности принимали значения:  $d_{\text{п}} = 2,0$  мм ( $E_{\text{п}} = 14,5$  и 18 Дж),  $d_{\text{п}} = 2,4$ ; 3,1; 3,4 мм ( $E_{\text{п}} = 18$  Дж) для углового распределения энергии, приведенного выше. Зависимость  $h = f(W_{\text{п}})$ , соответствующая этим условиям, представлена на рис. 4. При  $d_{\text{п}} = 2,0$  мм и  $E_{\text{п}} = 18$  Дж ( $W_{\text{п}} = 573$  Дж/см<sup>2</sup>) излучение прожигает пластину толщиной 2 мм насквозь. Большая эффективность воздействия, чем в варианте 1, обусловлена более высокой концентрацией энергии излучения в приосевой области пучка при фокусировке. В результате осевая область аблируемой части материала в температурных преобразованиях опережает периферийные, и образующаяся в ней парогазовая фаза высокого давления выдавливает жидкий «внешний» металл в радиальных направлениях. Это должно способствовать уменьшению экранирования падающего излучения парикапельными образованиями облучаемого металла.

Для сравнения на рис. 4 приведены результаты воздействия излучением свободной генерации (точки 6, 7 и 8). Временная структура излучения приведена на рис. 5. Эти точки соответствуют значениям  $d_{\text{п}} = 2,25; 2,05; 1,65$  мм, полученным фокусировкой излучения. Такое излучение генерировалось лазером на Nd-стекле с плоским резонатором. Значение  $E_{\text{п}}$  постоянно и равно 18 Дж.



**Рис. 4.** Зависимость глубины  $h$  кратера от плотности энергии  $W_{\text{п}}$  при воздействии излучением лазера с модуляцией добротности по варианту 2 на алюминиевый сплав Д16:

1–5 — с модуляцией добротности; 6–8 — свободная генерация;  $d_{\text{п}} = 3,4$  мм:  $E_{\text{п}} = 14,5$  Дж (1);  $d_{\text{п}} = 3,1$  мм:  $E_{\text{п}} = 14,5$  Дж (2);  $d_{\text{п}} = 2,4$  мм:  $E_{\text{п}} = 14,5$  Дж (3);  $d_{\text{п}} = 2,0$  мм:  $E_{\text{п}} = 14,5$  (4) и 18 Дж (5);  $d_{\text{п}} = 2,25$  мм:  $E_{\text{п}} = 18$  Дж (6);  $d_{\text{п}} = 2,05$  мм:  $E_{\text{п}} = 18$  Дж (7);  $d_{\text{п}} = 1,65$  мм:  $E_{\text{п}} = 18$  Дж (8)



**Рис. 5.** Осциллограммы излучения свободной генерации лазера на Nd-стекле

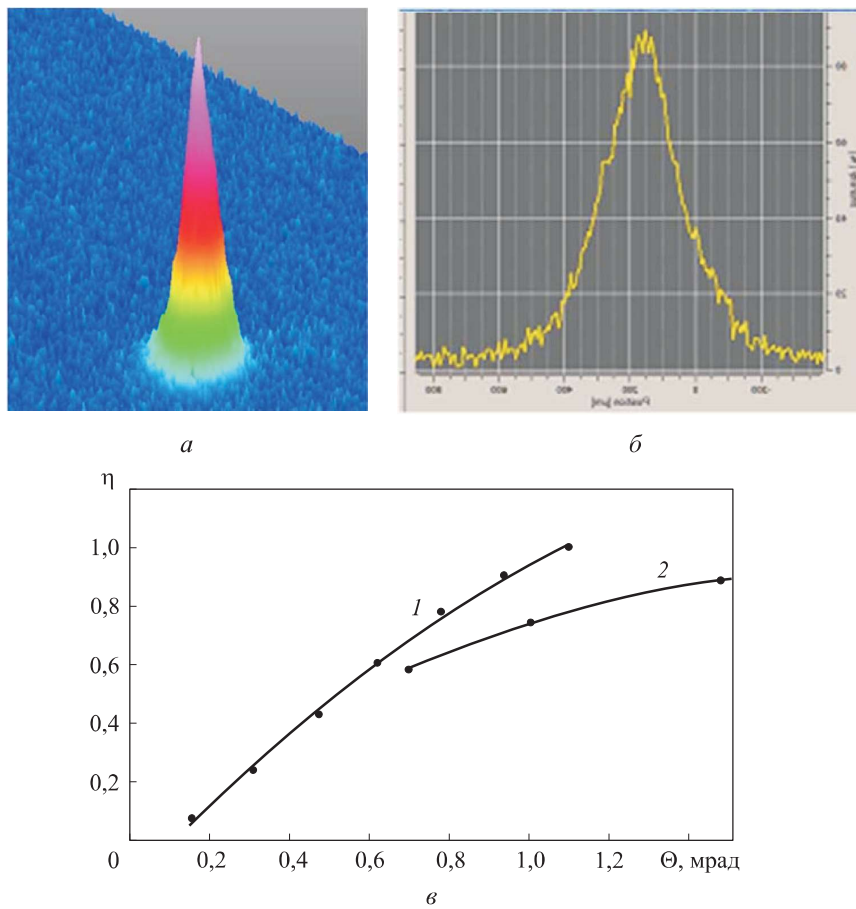


Согласно приведенным результатам, излучение с такими временными характеристиками — хаотичные высокочастотные пульсации с длительностью пиков единицы микросекунд, на порядок уступает по эффективности воздействия на алюминиевый сплав эффективности воздействия излучения, полученного при высокочастотной модуляции добротности.

Еще в большей степени увеличивается эффективность прожигания металла по варианту 2 при использовании излучения, полученного с помощью лазера с неустойчивым телескопическим (НТ) резонатором [15]. Дальнопольное распределение энергии излучения лазера на Nd-стекле с НТ-резонатором при увеличении  $M = 2$  приведено на рис. 6. Оно регистрировалось с помощью цифровой камеры *BC-106 VIC* в фокальной плоскости линзы с фокусным расстоянием 194 см. Это распределение представлено в форме объемной картины (рис. 6, а), ее осевого сечения (рис. 6, б) и зависимости углового распределения энергии (рис. 6, в). Эта зависимость  $\eta(\Theta)$  построена как отношение энергии лазерного излучения в пределах угла  $E(\Theta)$  к его полной энергии. Значения  $E(\Theta)$  определялись путем «интегрирования» поперечного распределения излучения (см. рис. 6, б). Шкала на оси абсцисс (см. рис. 6, в) представлена в угловой мере — одно деление соответствует  $1 \cdot 10^{-4}$  рад. Здесь для сравнения приведена аналогичная характеристика, соответствующая данным, приведенным выше. Пространственное распределение сфокусированного излучения лазера с НТ-резонатором более подходит для решаемой задачи из перечисленных вариантов, что демонстрируется результатами по воздействию (рис. 7, по сравнению с рис. 4).

Следует отметить, что лазер с НТ-резонатором работал в режиме свободной генерации. У лазера с таким резонатором излучение представляет пиковую структуру с длительностью пиков, измеряемой сотнями наносекунд при среднем значении частоты их повторения десятки кГц. Таким образом, это достаточно мощные импульсы. Однако эффективность излучения лазера с подобным резонатором может быть еще более увеличена при реализации режима генерации с высокочастотной модуляцией добротности.

Приведем результаты измерений  $W_{\text{п}}$  для пластин из коррозионно-стойкой стали 18Х10Н8Т и алюминиевого сплава Д16. Источник излучения Nd-лазер на стекле ГЛС-22 с пассивным затвором из АИГ:Cr<sup>4+</sup> при начальном пропускании 96 %. Измерения выполнены по варианту 2. Характерные осциллограммы высокочастотной пиковой структуры излучения приведены на рис. 8. Период следования пиков в пределах импульса накачки находится в интервале 20...25 мкс, а их длительность — в интервале 120...130 нс.

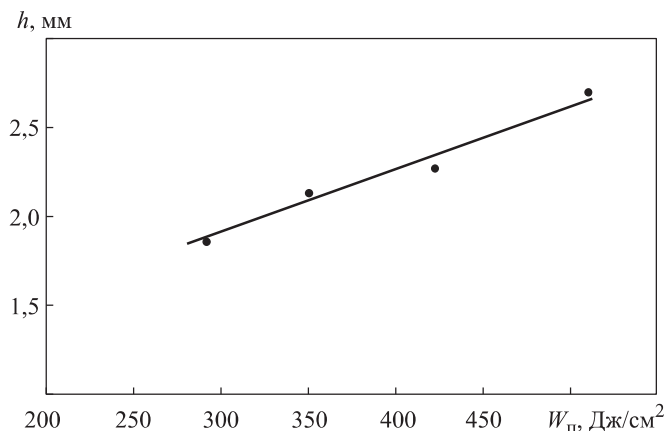


**Рис. 6.** Дальнопольное распределение энергии излучения лазера на Nd-стекле с НТ-резонатором при увеличении  $M = 2$ :

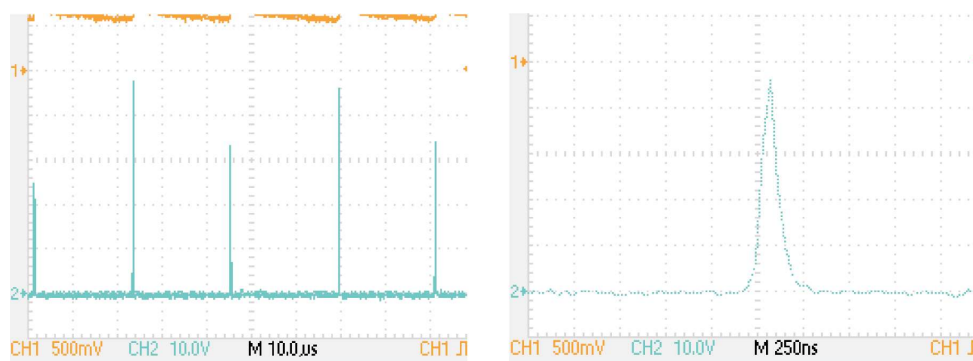
*a* — объемная картина; *б* — ее осевое сечение; *в* — угловое распределение энергии излучения (*1* — для НТ-резонатора; *2* — по приведенным выше данным)

Энергия излучения после фокусирующей системы  $E_{\text{п}} = 13,5$  Дж. Угловое распределение этого излучения уступало полученному выше угловому распределению.

Для пластин из коррозионно-стойкой стали получены следующие результаты: при  $d_{\text{п}} = 1,3$  мм и  $W_{\text{п}} = 1018$  Дж/см<sup>2</sup> пластины толщиной 0,8 и 1,0 мм прожигались за два импульса накачки ( $m = 2$ ). При этом диаметры выходных отверстий  $d_{\text{вых}}$  равны 0,65 и 0,55 мм. Из этого следует, что значение  $W_{\text{п}}$  для стали толщиной 0,8 мм заметно меньше  $2W_{\text{п}} = 2036$  Дж/см<sup>2</sup>. Для сравнения при свободной генерации (см. рис. 6):  $d_{\text{п}} = 1,3$  мм,  $E_{\text{п}} = 15,0$  Дж,  $W_{\text{п}} = 1131$  и  $10179$  Дж/см<sup>2</sup>, поскольку такая же пластина прожигалась за девять импульсов накачки.



**Рис. 7.** Зависимость глубины  $h$  кратера от плотности энергии  $W_{п}$  при воздействии излучением лазера с НТ-резонатором (свободная генерация) по варианту 2 на алюминиевый сплав Д16



**Рис. 8.** Пичковая структура излучения лазера на Nd-стекле при пассивной модуляции добротности

Подобные измерения, выполненные при прожигании пластины толщиной 0,8 мм из алюминиевого сплава Д16, показали еще большие преимущества излучения в форме высокочастотной регулярной последовательности субмикросекундных импульсов. Для излучения с регулярной пичковой структурой:  $d_{п} = 1,2$  мм,  $W_{п} = 1194$  Дж/см<sup>2</sup>,  $m = 1$ ,  $W_{п} = 1194$  Дж/см<sup>2</sup>,  $d_{вых} = 0,75$  мм. Для излучения свободной генерации:  $d_{п} = 1,2$  мм,  $W_{п} = 1327$  Дж/см<sup>2</sup>,  $m = 10$ ,  $W_{п} = 13270$  Дж/см<sup>2</sup>,  $d_{вых} = 0,32$  мм. Коррозионно-стойкая сталь оказалась более прочным материалом, чем сплав Д16, к воздействию излучения Nd-лазера в форме высокочастотной последовательности коротких пиков. При облучении импульсами излучения, полученными в режиме свободной генерации, более стойким является алюминиевый сплав.

Далее приведены результаты исследования зависимости эффективности прожигания металла от длительности импульса накачки  $\tau_n$  (соответственно генерации) с использованием излучения ИЛФ:Nd-лазера с диодной накачкой. Важность знания подобной зависимости необходима для оптимизации режима лазерной генерации при технологических операциях сверления металлов. Существование подобной зависимости следует из качественного анализа данного процесса. При лазерном сверлении, в определенных режимах, за время облучения металл под действием излучения проходит все теплофизические изменения, включая стадию плавления, до стадии удаления. На это расходуется энергия передней части генерируемого излучения. Следующие фрагменты лазерного излучения идут на удаление жидкого металла, «нагрев» его до образования нового расплава с удалением, и т. д. Таким образом, рассмотрение процесса преобразования металла показывает, что увеличение длительности  $\tau_n$  должно способствовать повышению эффективности сверления. Однако рассмотрение процесса воздействия лазерного излучения показывает, что увеличение длительности  $\tau_n$ , кроме роста энергии аблирующего излучения, должно приводить к увеличению доли излучения накачки, идущей на нагрев активного элемента. При неоднородном распределении ее в активном элементе неизбежны термооптические искажения его и резонатора, приводящие к изменению поперечной структуры лазерного излучения. При этом будет меняться и характер взаимодействия излучения с металлом. Согласно изложенному, должна существовать длительность импульса накачки (оптимальная), при которой отрицательная составляющая процесса еще не доминирует и реализуется максимальная эффективность прожигания металла. Такая зависимость должна физически определяться свойствами АС, спектральными параметрами излучения источника накачки лазера и мощностью его излучения.

Особенность импульсного излучения диодных излучателей, используемых для накачки лазеров, — неизменность мощности излучения во времени. В связи с этим с увеличением длительности  $\tau_n$  (импульсы прямоугольной формы) пропорционально ей возрастает энергия лазерного излучения. Значения параметров излучения ИЛФ:Nd-лазера с диодной накачкой в зависимости от  $F_m$  и  $\tau_n$  при постоянной мощности накачки приведены ниже.

**Значения параметров лазерного излучения ИЛФ:Nd-лазера при  $\tau_n = 4$  мс**

$F_m$ , кГц .....	25	30	35	40	45	50	80	Свободная генерация
$E$ , Дж .....	1,50	1,65	1,68	1,70	1,71	1,71	1,71	1,79
$E_b$ , мДж ....	16,3	14,9	12,9	11,5	10,2	9,2	3,4	–
$\tau_{0,5}$ , нс .....	130	140	–	–	–	300	500	–

**Значения энергии излучения ИЛФ:Nd-лазера в зависимости от длительности импульса накачки  $\tau_n$  ( $F_m = 25$  кГц)**

$\tau_n$ , мс .....	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$E$ , Дж .....	1,12	1,59	2,01	2,49	2,93	3,36	3,70	4,11	4,50	4,91

Выбор значения  $F_m = 25$  кГц обусловлен максимальной эффективностью прожигания коррозионно-стойкой стали (18X10H8T) сфокусированным излучением при такой частоте модуляции в рассматриваемом эксперименте. С этим излучением проводились измерения с целью установить зависимости эффективности прожигания стали от длительности импульса накачки (генерации). Критерием эффективности являлась суммарная энергия сквозного прожигания  $E_{пр}$  листа толщиной 2 мм излучением за  $m$  импульсов накачки. Период следования импульсов накачки примерно равен 5 с, с помощью чего достигались охлаждение активного элемента и неизменность параметров лазерного излучения при всех импульсах накачки, а также постоянство теплофизического состояния аблируемого металла. Этим гарантировалась корректная оценка эффективности действия лазерного излучения от длительности  $\tau_n$  при неизменной мощности импульса накачки в разовом режиме работы лазера. Результаты измерений приведены ниже.

**Значения энергии прожигания стали толщиной 2 мм излучением ИЛФ:Nd-лазера в зависимости от длительности импульса накачки  $\tau_n$  ( $F_m = 25$  кГц)**

$\tau_n$ , мс .....	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$m$ .....	190	130	90	70	40	27	20	20	20	20
$E_{пр}$ , Дж .....	213	207	181	174	117	91	74	82	90	98

Согласно представленным результатам, следует явная зависимость величины  $E_{пр}$  металла от длительности  $\tau_n$ . Для стали и заданных прочих параметрах излучения оптимальное значение  $\tau_n$  составило 9 мс. Уменьшение значения  $E_{пр}$  на первой стадии удлинения импульсов накачки обусловлено, очевидно, пропорциональным увеличением энергии лазерного излучения, и при оптимальном значении  $\tau_n$  глубина прожигания металла  $h$  за импульс накачки достигает максимального значения. Дальнейшее увеличение длительности  $\tau_n$  и энергии  $E_{пр}$  приводит к возрастанию термооптических искажений активного элемента и резонатора, а также к ухудшению пространственной структуры аблирующего излучения. На этом вре-

менном отрезке действия излучения может происходить частичное за-  
плавление прожженного канала, что будет приводить к снижению эффек-  
тивности процесса в целом. Следует отметить, что проявление закономер-  
ности процесса прожигания металла будет происходить тогда, когда  
сквозное прожигание невозможно осуществить за один импульс накачки.  
Если прожигание происходит за один импульс накачки, то оптимальной  
будет накачка с меньшей энергией.

**Заключение.** Проведены экспериментальные исследования процесса  
прожигания излучениями Nd-лазеров металлических пластин в зависи-  
мости от энергетических, временных и пространственных параметров  
излучения. Установлено следующее.

При действии на металл излучением в виде высокочастотной после-  
довательности мощных пичков максимальный аблирующий эффект реа-  
лизуется на частотах  $F_m$  (оптимальные), подчиняющихся линейной зави-  
симости от плотности энергии действующего излучения  $W_{\text{п}}$ , в рамках  
эксперимента изменяемой в диапазоне значений 200...600 Дж/см<sup>2</sup>.

В режимах максимального абляционного эффекта, реализуемых при  
разных значениях  $W_{\text{п}}$  и соответствующих им значениях  $F_m$ , средние значе-  
ния плотности энергии излучения одиночных пичков на поверхности ме-  
талла примерно одинаковы и для алюминиевого сплава  $W_{\text{п}i} \approx 2$  Дж/см<sup>2</sup>.

Продемонстрировано увеличение эффективности прожигания ме-  
таллов модулированным лазерным излучением по сравнению с излуче-  
нием режима свободной генерации более чем на порядок.

Рассмотрены варианты поперечного распределения аблирующих из-  
лучений, показывающие рост эффективности прожигания металла при  
относительном увеличении осевой интенсивности этих излучений.

Показано, что при импульсной накачке также существует экстре-  
мальная зависимость эффективности прожигания от длительности им-  
пульса накачки (генерации) при неизменной его мощности.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Рэди Дж. Действие мощного лазерного излучения. М., Мир, 1974.
- [2] Арутюнян Р.В., Баранов В.Ю., Большов Л.А. и др. Теплогидродинамические модели воздействия импульсно-периодического излучения на материалы. *Квантовая электроника*, 1987, т. 14, № 2, с. 271–278.
- [3] Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Головизнин В.М. и др. Вытеснение расплава при нестационарном лазерном воздействии на металлы. *ДАН СССР*, 1987, т. 292, № 1, с. 89–92.

- [4] Гончаров В.К., Карабань В.И., Колесник А.В. Изменение во времени оптических характеристик лазерного эрозионного факела. *Квантовая электроника*, 1985, т. 12, № 4, с. 762–766.
- [5] Гончаров В.К., Карабань В.И., Остромецкий В.А. Экранировка лазерного излучения продуктами разрушения различных металлов. *Квантовая электроника*, 1986, т. 13, № 6, с. 1235–1240.
- [6] Кравец А.Н., Крайнов А.С., Родин В.Ю. и др. Повышение эффективности резки алюминиевых сплавов комбинированным лазерным излучением. *Сварочное производство*, 1997, № 8, с. 34–38.
- [7] Деев А.А., Кикин П.Ю., Пчелинцев А.И. Размерная обработка металлов лазерными импульсами сложной амплитудно-временной структуры. *Письма в ЖТФ*, 1992, т. 18, № 6, с. 68–71.
- [8] Арутюнян Р.В., Баранов В.Ю., Большов Л.А. и др. Вынос материала твердой мишени при комбинированном воздействии двух лазерных импульсов разной длительности. *Квантовая электроника*, 1984, т. 11, № 6, с. 1220–1224.
- [9] Гиппиус Н.А., Данилейко Ю.К., Ионов П.В. и др. Возможности комбинированного воздействия излучения двух YAG:Nd<sup>3+</sup>-лазеров на металлы. *ДАН СССР*, 1989, т. 308, № 5, с. 1122–1127.
- [10] Климентов С.М., Пивоваров П.А., Конов В.И. и др. Лазерная микрообработка в газовой среде при высокой частоте повторения аблирующих импульсов. *Квантовая электроника*, 2004, т. 34, № 6, с. 537–540.
- [11] Горный С.Г., Григорьев А.М., Петров М.И. и др. Специфика поверхностной обработки металла сериями лазерных импульсов наносекундной длительности. *Квантовая электроника*, 2002, т. 32, № 10, с. 929–932.
- [12] Босак Н.А., Васильев С.В., Иванов А.Ю. и др. Особенности формирования кратера на поверхности металла, облучаемого повторяющимися лазерными импульсами. *Квантовая электроника*, 1999, т. 27, № 1, с. 69–72.
- [13] Климентов С.М., Кононенко Т.В., Пивоваров П.А. и др. Роль плазмы в абляции материалов ультракороткими лазерными импульсами. *Квантовая электроника*, 2001, т. 31, № 5, с. 378–382.
- [14] Басиев Т.Т., Гарнов С.В., Климентов С.М. и др. Высокоскоростное аблирование сверхглубоких каналов фазово-сопряженным Nd-АИГ-лазером с динамически регулируемой пассивной модуляцией добротности. *Квантовая электроника*, 2007, т. 37, № 10, с. 956–960.
- [15] Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения. М., Наука, 1979.

**Глов Александр Николаевич** — старший преподаватель кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Голубенко Юрий Владимирович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Десяцков Владимир Александрович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Степанов Алексей Валерьевич** — научный сотрудник НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Глотов А.Н., Голубенко Ю.В., Десяцков В.А. и др. Некоторые особенности взаимодействия лазерного излучения с металлами. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2020, № 1 (130), с. 15–32.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-1-15-32>

**CERTAIN FEATURES OF INTERACTION BETWEEN  
LASER RADIATION AND METALS**

**A.N. Glotov**

[aglotov@mail.ru](mailto:aglotov@mail.ru)

**Yu.V. Golubenko**

**V.A. Desyatskov**

[luwona@yandex.ru](mailto:luwona@yandex.ru)

**A.V. Stepanov**

[stepanov\\_3@mail.ru](mailto:stepanov_3@mail.ru)

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

---

**Abstract**

The paper presents experimental investigation results concerning the problem of optimising the efficiency of interaction between laser radiation and metals. We used several types of Nd lasers featuring the desired combination of power, temporal and spatial radiation parameters as sources of the radiation required. To pump these lasers, we employed rectangular pulses at a periodicity eliminating effects characteristic of continuous-wave and pulsed laser operation modes. This limits the laser radiation parameters driving the interaction efficiency functions to strictly those parameters that match the single-pulse laser operation mode. Temporal radiation parameter variation involved measurements in the free-running and high-frequency Q-switching modes as well as adjusting pumping (lasing) pulse durations. Power parameter variation was imple-

**Keywords**

*Laser radiation, high-frequency Q-switching, radiation energy density, transverse distribution, ablative process, interaction efficiency*



mented through altering radiation energy density over the irradiated surface. Spatial structure of the ablative radiation was varied by means of optical radiation transfer facilities and different laser emitters. The experimental investigation results allowed us to establish certain patterns concerning the interaction between laser radiation and metals as a function of radiation parameters listed

Received 25.06.2019

Accepted 04.07.2019

© Author(s), 2020

---

## REFERENCES

- [1] Ready J. Effects of high-power laser radiation. Academic Press, 1971.
- [2] Arutyunyan R.V., Baranov V.Yu., Bol'shov L.A., et al. Thermohydrodynamic models of the interaction of pulse-periodic radiation with matter. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1987, vol. 17, no. 2, pp. 163–168.  
DOI: <https://doi.org/10.1070/QE1987v017n02ABEH006560>
- [3] Arutyunyan R.V., Bol'shov L.A., Goloviznin V.M., et al. Displacement of melt at nonstationary laser effect on metals. *Doklady AN SSSR*, 1987, vol. 292, no. 1, pp. 89–92 (in Russ.).
- [4] Goncharov V.K., Karaban' V.I., Kolesnik A.V. Time dependences of the optical properties of a laser erosion jet. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1985, vol. 15, no. 4, pp. 498–500. DOI: <https://doi.org/10.1070/QE1985v015n04ABEH006970>
- [5] Goncharov V.K., Karaban' V.I., Ostrometskiĭ V.A. Screening of laser radiation by the damage products of different metals. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1986, vol. 16, no. 6, pp. 808–811. DOI: <https://doi.org/10.1070/QE1986v016n06ABEH006914>
- [6] Kravets A.N., Kraynov A.S., Rodin V.Yu., et al. Raising efficiency of cutting aluminum alloys by combined laser radiation. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1997, no. 8, pp. 34–38 (in Russ.).
- [7] Deev A.A., Kikin P.Yu., Pchelintsev A.I. Dimensional processing of metals by laser pulses of complex amplitude-time structure. *Pis'ma v ZhTF*, 1992, vol. 18, no. 6, pp. 68–71 (in Russ.).
- [8] Arutyunyan R.V., Baranov V.Yu., Bol'shov L.A., et al. Ejection of material from a solid target subjected to the combined action of two laser pulses of differing durations. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1984, vol. 14, no. 6, pp. 821–825.  
DOI: <https://doi.org/10.1070/QE1984v014n06ABEH005176>
- [9] Gippius N.A., Danileyko Yu.K., Ionov P.V., et al. Possibility of combined effect of two YAG:Nd<sup>3+</sup>-lasers radiation on metals. *Doklady AN SSSR*, 1989, vol. 308, no. 5, pp. 1122–1127 (in Russ.).
- [10] Klimentov S.M., Pivovarov P.A., Konov V.I., et al. Laser microprocessing in a gas environment at a high repetition rate of ablative pulses. *Quantum Electron.*, 2004, vol. 34, no. 6, pp. 537–540. DOI: <https://doi.org/10.1070/QE2004v034n06ABEH002769>
- [11] Gornyi S.G., Grigor'ev A.M., Petrov M.I., et al. Specific features of metal surface processing by nanosecond laser pulse trains. *Quantum Electron.*, 2002, vol. 32, no. 10, pp. 929–932. DOI: <https://doi.org/10.1070/QE2002v032n10ABEH002320>

- [12] Bosak N.A., Vasil'ev S.V., Ivanov A.Yu., et al. Characteristic features of the formation of a crater on the surface of a metal irradiated with repeated laser pulses. *Quantum Electron.*, 1999, vol. 29, no. 4, pp. 351–354.  
DOI: <https://doi.org/10.1070/QE1999v029n04ABEH001486>
- [13] Klimentov S.M., Kononenko T.V., Pivovarov P.A., et al. The role of plasma in ablation of materials by ultrashort laser pulses. *Quantum Electron.*, 2001, vol. 31, no. 5, pp. 378–382. DOI: <https://doi.org/10.1070/QE2001v031n05ABEH001958>
- [14] Basiev T.T., Garnov S.V., Klimentov S.M., et al. High-speed ablation of ultradeep channels by a phase-conjugate dynamically controlled passively Q-switched Nd:YAG laser. *Quantum Electron.*, 2007, vol. 37, no. 10, pp. 956–960.  
DOI: <https://doi.org/10.1070/QE2007v037n10ABEH013624>
- [15] Ananyev Yu.A. Opticheskie rezonatory i problema raskhodimosti lazernogo izlucheniya [Optical resonators and problem of laser radiation divergence]. Moscow, Nauka Publ., 1979.

**Glotov A.N.** — Assist. Professor, Department of Radioelectronic Systems and Devices, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Golubenko Yu.V.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Desyatskov V.A.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Bauman-skaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Stepanov A.V.** — Research Fellow, Research Institute of Radioelectronic Technology, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Glotov A.N., Golubenko Yu.V., Desyatskov V.A., et al. Certain features of interaction between laser radiation and metals. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2020, no. 1 (130), pp. 15–32 (in Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-1-15-32>