

## ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО РЕЖИМА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Докт. физ.-мат. наук, проф. АПОЛЛОНОВ В. В.<sup>1)</sup>, докт. техн. наук, проф. ДЕВОЙНО О. Г.<sup>2)</sup>,  
докт. техн. наук КАЛИНИЧЕНКО А. С.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Институт общей физики РАН, Российская Федерация,

<sup>2)</sup>Белорусский национальный технический университет

E-mail: vapollo@kapella.gpi.ru; scvdmed@bntu.by

Целью настоящей работы является оценка применения импульсно-периодического режима для повышения эффективности лазерной обработки. Лазерные технологии нашли широкое применение в процессах обработки материалов для придания им заданных поверхностных свойств, а также для резки листовых материалов с высокой точностью. Несомненный интерес представляет применение комплексной обработки, в первую очередь изношенных поверхностей, включающей формирование слоя путем газопламенного нанесения порошковой смеси определенного состава и последующего лазерного оплавления.

Важной задачей для повышения эффективности применения лазерных технологий в машиностроении является увеличение мощности лазерных установок. В настоящее время в технологических процессах, использующих лазеры с большой средней мощностью (более 100 Вт), нашли применение только источники, работающие в двух режимах – непрерывном и импульсно-периодическом (И-П) с частотой повторения импульсов от единиц до сотен герц и длительностью в пределах десятков-сотен микро- и даже миллисекунд. С другой стороны, экранирующий эффект образующегося плазменного облака при процессах лазерного легирования, наплавки, сварки снижает эффективность обработки в некоторых случаях до 50 % в зависимости от состава плазмы и длины волны лазерного излучения. Высокочастотные И-П лазерные системы с большой средней мощностью, работающие в режиме модуляции добротности, позволяют реализовать принципиально другой механизм взаимодействия излучения с веществом – абляцию, обеспечивающую локальность выделения энергии не только в пространстве, но и во времени.

Проведенный анализ показал, что И-П режим работы лазера для большинства процессов обработки намного лучше и эффективнее, чем непрерывный режим, с энергетической точки зрения. На основе наших разработок можно говорить о возможности реализации лазерных систем, работающих в высокочастотном И-П режиме с большой средней мощностью – выше сотен ватт.

**Ключевые слова:** лазерная обработка, большая средняя мощность, импульсно-периодический режим, эффективность лазерных систем.

Библиогр.: 12 назв.

## APPLICATION OF PULSE-PERIODICAL MODE FOR IMPROVEMENT OF LASER TREATMENT EFFICIENCY

APOLLONOV V. V.<sup>1)</sup>, DEVOINO O. G.<sup>2)</sup>, KALINICHENKO A. S.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>General Physics Institute RAS, Russia,

<sup>2)</sup>Belarusian National Technical University

The purpose of the paper is to estimate an application of pulse-periodical mode for improvement of laser treatment efficiency. Laser technologies have been widely used in the processes of material treatment with the purpose to provide them the required surface properties and also for high accuracy cutting of sheet materials. Application of complex treatment is of great interest and especially when it is used for worn-out surfaces with formation of a coating by gas-flame laying of powder mixture of specific composition and subsequent laser fusion.

Increase of laser unit capacity is very important task for higher efficiency of laser technology application in mechanical engineering. Nowadays technological processes using lasers with high average power (more than 100 W) have been applying only sources that are working in two modes, namely: continuous and pulse-periodical (P-P) with pulse repetition rate from some units to several hundred hertz and pulse duration within dozens to hundreds of microseconds and even within milliseconds. On the other hand, in some cases shielding effect of plasma cloud formed during laser alloying, cladding or welding reduces the efficiency of laser treatment up to 50 % depending on plasma composition and laser beam length. High frequency P-P laser systems

with high average power working in mode of Q-factor modulation allow to realize principally other mechanism of irradiation interaction with materials that is an ablation. In this case it is possible to provide local energy release both in space and time.

The performed analysis has revealed that P-P mode of laser operation for a majority of treatment processes is much better and more efficient from energetic point of view in comparison with the continuous mode. On the basis of the developments it is possible to make a conclusion that there is a possibility to create laser systems working in high frequency P-P mode with high average power above hundreds watt.

**Keywords:** laser treatment, high average power, pulse-periodical mode, efficiency of laser systems.

Ref.: 12 titles.

Лазерные технологии нашли широкое применение в процессах обработки материалов с целью придания им заданных поверхностных свойств, а также для резки и раскроя листовых материалов с высокой точностью [1]. Успешно применяется лазерное легирование деталей из черных и цветных металлов и сплавов [2–5]. Управляя технологическими параметрами лазерной обработки, можно обеспечивать формирование свойств по определенному закону не только в слоях, подвергшихся термическому воздействию лазерного луча, но и в примыкающем слое основного материала [6, 7]. Значительные успехи достигнуты в повышении износостойкости деталей при использовании лазерных технологий [8, 9]. Несомненный интерес представляет применение комплексной обработки, в первую очередь изношенных поверхностей, включающей формирование слоя путем газопламенного нанесения порошковой смеси определенного состава и последующего лазерного оплавления [10].

Важной задачей для повышения эффективности применения лазерных технологий в машиностроении является увеличение мощности лазерных установок, что позволяет повысить производительность процесса, выполнять обработку материалов с высокой температурой плавления при высокой производительности, а также резку листовых материалов значительной толщины (более 30 мм) с высокой рентабельностью. Все это способствует повышению конкурентоспособности лазерных технологий. Однако при увеличении мощности лазерных систем встает вопрос о сохранении качества лазерного луча.

Перспективно также использование импульсно-периодического (И-П) излучения не только для процессов, связанных с удалением материала, но и для технологий, базирующихся на процессах плавления материала, – лазерного легирования, наплавки, сварки. Как известно,

экранирующий эффект образующегося при таких процессах плазменного облака снижает эффективность обработки в некоторых случаях до 50 % в зависимости от состава плазмы и длины волны лазерного излучения. Как правило, при использовании непрерывного излучения в процессах с плавлением устанавливается автоколебательный режим, связанный с периодическим возникновением и затуханием плазменного облака. В современных технологиях часто используют так называемый квази-импульсный режим, заключающийся в периодическом выключении лазера. При этом современные промышленные лазеры позволяют обеспечить частоту порядка нескольких кГц. Это позволяет повысить термический КПД технологического процесса с плавлением поверхности с одновременным уменьшением средней мощности обработки.

В настоящее время в технологических процессах, использующих лазеры с большой средней мощностью (более 100 Вт), нашли применение только источники, работающие в двух режимах – непрерывном и И-П с частотой повторения импульсов от единиц до сотен герц и длительностью в пределах десятков-сотен микро- и даже миллисекунд. При этом в обсуждаемых технологических процессах в основном реализуется чисто тепловой механизм воздействия, так как используется возможность лазерного источника подвести достаточно большое количество энергии к малой площади поверхности обрабатываемой детали. Высоко-частотные И-П лазерные системы с большой средней мощностью, работающие в режиме модуляции добротности, который обеспечивает длительности импульсов в периодической последовательности от единиц до сотен наносекунд, позволяют реализовать принципиально другой механизм взаимодействия излучения с веществом – возгонку (абляцию), обеспечивающую локальность выделения энергии не толь-

ко в пространстве, но и во времени [1, 2]. При этом происходит взрывное локальное испарение вещества без промежуточной жидкой фазы. Такой механизм может существенно расширить область технологических применений лазерных источников. Однако он не нашел реального применения на практике в силу большой сложности его реализации, требуемой в значительном ряде технологий среднего уровня мощности. В основном такие лазеры при незначительном уровне мощности используются при микрообработке поверхностей, маркировке изделий, скрайбировании, термораскалывании, сверлении микроотверстий, лазеро-индуцированном химическом травлении.

Известно, что для непрерывного излучения пороговая плотность мощности испарения определяется как

$$q_n = \frac{kT_n}{Ar_0},$$

где  $T_n$  – температура испарения;  $A$  – коэффициент поглощения;  $k$  – коэффициент теплопроводности;  $r_0$  – радиус поперечного сечения луча в фокальной плоскости.

Принимая для среднеуглеродистой конструкционной стали:  $T_n = 3000$  К;  $A = 0,5$  (для длины волны  $\lambda = 1,06$  мкм);  $k = 0,32$  Вт/(см·К);  $r_0 = 10$  мкм, получаем  $q_n = 1,9 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Соответствующая мощность лазера равна

$$P_n = qS,$$

где  $S$  – площадь лазерного пятна, и таким образом  $P_n \approx 6,0$  Вт.

Для И-П лазерного источника с теми же параметрами и соответствующим тепловым режимом пороговая плотность мощности может быть выражена как

$$q_n = \frac{kT_n}{2A} \sqrt{\frac{\pi}{a\tau}},$$

( $a$  – коэффициент температуропроводности, для стали  $a = 3,45 \cdot 10^{-2}$  см<sup>2</sup>/с), что дает величину  $q_n \approx 0,9 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>.

Кроме того, можно вычислить импульсную мощность  $P_n$  и среднюю мощность  $\bar{P}_n$ :

$$\bar{P}_n = P_n f \tau = Wf,$$

где  $f$  – частота повторения импульсов.

После вычислений:  $P_n \approx 2,8$  Вт и  $\bar{P}_n = 7 \cdot 10^{-2}$  Вт при  $\tau = 10^{-4}$  с;  $f = 50$  Гц. Итак, исходя из вышесказанного мы можем получить в общем случае следующее соотношение:

$$\frac{\bar{P}_n}{P_n} = f \tau \frac{r_0}{\sqrt{a\tau}}.$$

При вышеприведенных параметрах  $\frac{r_0}{\sqrt{a\tau}} \approx 1$  и  $\frac{\bar{P}_n}{P_n} = F\tau$  для  $f = 250$  Гц и  $\tau = 10^{-4}$  с получим, что  $\frac{\bar{P}_n}{P_n} = 10^{-2}$ ; для  $f = 1$  кГц и импульсов наносекундного диапазона  $\frac{\bar{P}_n}{P_n} = 10^{-6}$ .

Таким образом, для частоты повторения 30 кГц и импульсов длительностью 100 наносекунд, то есть режима, характерного для решения большинства машиностроительных задач, это отношение равно  $10^{-3}$ . Заметим, что физические процессы при И-П резке во многом совпадают с таковыми при сверлении отверстий, так как линия реза образуется как совокупность отдельных отверстий. Исходя из представленного выше можно заключить, что И-П режим работы лазера для большинства процессов обработки намного лучше и эффективнее, чем непрерывный режим.

Для практического применения важно оценить, какой режим работы лазера лучше, с точки зрения качества обработки материалов: непрерывный или импульсно-периодический. Для качественной обработки материала необходимо обеспечить следующие условия:

1) минимальное количество образующейся жидкой фазы. Учитываем, что количество жидкой фазы пропорционально  $\sqrt{a\tau}$ ;

2) максимальное количество жидкой фазы, удаляемой из зоны обработки (отверстия, разреза) в ходе процесса резки материала за счет давления паров. При этом давление пара отдачи пропорционально  $1/\tau$ .

Оба фактора указывают на то, что длительность импульса для И-П режима должна быть настолько короткой, насколько это возможно исходя из требования сохранения средней мощности.

Выполним это же сравнение с точки зрения требования на точность сканирующих систем, применяемых для обработки материалов. Очевидно, что для стабильных условий обработки (стабильного качества) необходимо обеспечить постоянство плотности потока мощности  $q$ . Требуемая величина  $q$  для сканирующих систем равна

$$q = \frac{h\nu_{\text{ск}}}{d_0} L_n,$$

или относительно мощности лазера  $P$  это же условие выражается как

$$\frac{P}{v_{\text{ск}}} = hd_0 L_n = \text{const} = B.$$

Исходя из этого мы можем еще раз подтвердить сделанный ранее вывод: с энергетической точки зрения И-П режим работы лазера для обработки намного лучше, чем непрерывный. Это означает, что стабильные условия подразумевают постоянство мощности лазера  $P$  и скорости сканирования пучка  $v_{\text{ск}}$ . Это особенно важно для обработки образцов сложной формы с высокой скоростью. В этом случае невозможно поддерживать одинаковую скорость на прямых линиях и крутых поворотах. Если  $v_{\text{ск}}$  не константа, а изменяется в соответствии с некоторым законом  $v_{\text{ск}}(t)$ , то невозможно удовлетворить условию  $P = Bv_{\text{ск}}(t)$  при любом контроле мощности непрерывного лазера.

Экспериментальные оценки, выполненные с использованием иттербиевого оптоволоконного лазера мощностью 1 кВт для операции поверхностной закалки с плавлением образца из серого чугуна СЧ20 с диаметром пятна 0,5 мм и скоростью перемещения луча 1100 мм/мин, показали, что переход от непрерывного режима обработки в импульсно-периодический с частотой 500 Гц и скважностью 0,5 приводит к уменьшению полезной мощности (затраченной на нагрев зоны до температуры термических превращений и на плавление поверхностного слоя) на 15 %.

Таким образом, применение лазеров, обеспечивающих переход к импульсному режиму без уменьшения средней мощности, представляется весьма перспективным для машиностроительного комплекса.

Одним из авторов (В. В. Аполлонов) в 2001 г. был реализован высокочастотный И-П  $\text{CO}_2$ -лазерный источник мощностью 10 кВт и твердотельный лазер с полупроводниковой накачкой мощностью 1 кВт. Однако это важное направление лазерной физики и высоких технологий до настоящего времени не получило эффективного развития из-за нехватки финансовых средств. Совместно разрабатываемый проект «Импульсар» должен позволить в самое ближайшее время выйти на создание высокоэффективных технологических комплексов для обработки материалов.

## ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ и расчеты показывают, что с энергетической точки зрения только импульсно-периодические лазеры могут обеспечить условие сохранения постоянной плотности потока мощности в обрабатываемой зоне и стабильное качество лазерной обработки изделия.

2. Освоенный уровень энергетических параметров для присутствующих на рынке лазеров, работающих в высокочастотном импульсно-периодическом режиме, составляет всего лишь несколько десятков ватт средней мощности. На основе разработок авторов статьи можно говорить о возможности реализации лазерных систем, работающих в высокочастотном И-П режиме с большой средней мощностью, и о необходимости их скорейшего промышленного производства для расширения спектра технологических применений. В настоящее время это уже хорошо понимают компании из Германии, США и Японии. Применяемые ими методы получения импульсно-периодического режима привели к достижению уровня выходной средней мощности Nd:YAG-лазера с  $n/n$  накачкой, равного 800 Вт.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Девойно, О. Г. Модифицирование поверхности покрытий с использованием лазерного нагрева / О. Г. Девойно, А. С. Калиниченко, М. А. Кардаполова. – Минск: БНТУ, 2013. – 230 с.
2. Bergmann, H. W. Laser Surface Alloying of AlSi12 and AlCr2.5Zr2.5 with Transition Metals and Si / H. W. Bergmann, P. H. Gundel, A. S. Kalinichenko // OPTO Electronic Magazin. – 1988. – Vol. 4, No 5. – P. 510–517.

3. **Lekala, M. B.**, Laser Surface Alloying of 316L Stainless Steel with Ru and Ni Mixtures / M. B. Lekala, J. W. van der Merwe, S. L. Pityana // *International Journal of Corrosion*. – 2012. – Article ID 162425.
4. **Hung-Yi, Chen.** Ti6Al4V Laser Alloying Process Control by Using a Self-Organizing Fuzzy Controller / Hung-Yi Chen, Shih-Jer Huang // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2004. – Vol. 44. Is. 15. – P. 1653–1665.
5. **Devoino, O. G.** Laser Alloying of Al-Si Alloys with Transition Metals / O. G. Devoino, A. S. Kalinichenko, U. A. Kalinichenko // *Proc. of 5<sup>th</sup> LANE 2007*. Meisenbach, Bamberg, 2007. – P. 761–765.
6. **Управление** градиентами свойств в процессах управляющей лазерной обработки / О. Г. Девойно [и др.] // *Лучевые технологии и применение лазеров: труды VII Международ. науч.-техн. конф.* – СПб.: ГПУ, 2013. – P. 203–211.
7. **Devoino, O. G.** Formation of Gradient Surface Layers by Means of Multifold Laser Alloying / O. G. Devoino, A. S. Kalinichenko, M. A. Kardapolova // *Наука и техника*. – 2014. – № 2. – С. 3–6.
8. **Devoino, O. G.** Methods of the Increase of Wear Resistance of Working Surfaces Applying Laser Treatment / O. G. Devoino, A. S. Kalinichenko, M. A. Kardapolova // *Surface Modification. Proc. Workshop*. 21–22.06.2006, Seoul. Korea. – P. 248–251.
9. **Formation** Wear-Resistant Coatings by Combination of Electrospark Alloying and Laser Treatment / M. Kardapolova [et al.] // *Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering – KOD 2012: Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Symposium*. – Hungary: Balatonfured, 2012. – P. 523–526.
10. **Девойно, О. Г.** Лазерная обработка износостойких газотермических композиционных покрытий / О. Г. Девойно, А. С. Калиниченко, М. А. Кардаполова. – Минск: БНТУ, 2011. – 161 с.
11. **High-Frequency** Repetitively Pulsed Operating Regime in High-Power Wide-Aperture Lasers / V. V. Apollonov [et al.] // *Quantum Electronics*. – 2003. – Vol. 33, № 9. – P. 753–757.
12. **Apollonov, V. V.** «Impulsar»: New Application for High Power High Repetition Rate Pulse-Periodic Lasers / V. V. Apollonov // *Laser Pulse Phenomena and Applications*. – Croatia: INTECH, 2010. – P. 29–44.
2. **Bergmann, H. W., Gundel, P. H., & Kalinichenko, A. S.** (1988) Laser Surface Alloying of AlSi12 and AlCr2.5Zr2.5 with Transition Metals and Si. *OPTO Electronic Magazin*, 4 (5), 510–517.
3. **Lekala, M. B., Van Der Merwe, J. W., & Pityana, S. L.** (2012) Laser Surface Alloying of 316L Stainless Steel with Ru and Ni Mixtures *International Journal of Corrosion*, 2012, Article ID 162425. Doi: 10.1155/2012/162425.
4. **Hung-Yi, Chen, & Shih-Jer Huang** (2004) Ti6Al4V Laser Alloying Process Control by Using a Self-Organizing Fuzzy Controller. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44 (15), 1653–1665.
5. **Devoino, O. G., Kalinichenko, A. S., & Kalinichenko, U. A.** (2007) Laser Alloying of Al-Si Alloys with Transition Metals. *Proceedings of the 5<sup>th</sup> LANE Conference*, Meisenbach Verlag, 761–765.
6. **Devoino, O. G.** (2013) Control Gradients Properties a Hardening Process of Laser Processing. *Luchevye Tekhnologii i Primenenie Lazero. Trudy VII Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii* [Beam Technologies and Laser Application. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference]. Saint-Petersburg, Publishing House SpB, SPU, 203–211 (in Russian).
7. **Devoino, O. G., Kalinichenko, A. S., & Kardapolova, M. A.** (2014) Formation of Gradient Surface Layers by Means of Multifold Laser Alloying. *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], 2, 3–6 (in Russian).
8. **Devoino, O. G., Kalinichenko, A. S., & Kardapolova, M. A.** (2006) Methods of the Increase of Wear Resistance of Working Surfaces Applying Laser Treatment. *Surface Modification. Proc. Workshop*. 21–22.06.2006. Seoul. Korea, 248–251.
9. **Kardapolova, M. A.** (2012) Formation Wear-Resistant Coatings by Combination of Electrospark Alloying and Laser Treatment. *Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering – KOD 2012. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Symposium*. Balatonfured, Hungary, 523–526.
10. **Devoino, O. G., Kalinichenko, A. S., & Kardapolova, M. A.** (2011) *Laser Treatment of Wear-Resistant Gas-Thermal Composite Coatings*. Minsk, BNTU (in Russian).
11. **Apollonov, V. V., Kiyko, V. V., Kislov, V. I., Suzdaltsev, A. G., & Egorov, A. B.** (2003) High-Frequency Repetitively Pulsed Operating Regime in High-Power Wide-Aperture Lasers. *Quantum Electronics*, 33 (9), 753–757. Doi: 10.1070/QE2003v033n09ABEH002496.
12. **Apollonov, V. V.** (2010) «Impulsar»: New Application for High Power High Repetition Rate Pulse-Periodic Lasers. *Laser Pulse Phenomena and Applications*. Croatia, INTECH, 29–44.

## REFERENCES

1. **Devoino, O. G., Kalinichenko, A. S., & Kardapolova, M. A.** (2013) *Modification of Surface Coatings While Using Laser Heating*. Minsk, BNTU (in Russian).

Поступила 23.06.2014