

Летягин И.Ю., Феликан К.В., Беленький В.Я., Ериков А.П. Исследование параметров плазмы, формируемой в зоне лазерной сварки в вакууме // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 60–65. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.1.08

Letyagin I.Yu., Felikan K.V., Belenkiy V.Ya., Erikov A.P. Investigation of parameters of plasma formed in the zone of laser welding in vacuum. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 60–65. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.1.08

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 23, № 1, 2021
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2021.1.08
УДК 621.791

И.Ю. Летягин¹, К.В. Феликан¹, В.Я. Беленький¹, А.П. Ериков²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

²Пермский военный институт войск национальной гвардии
Российской Федерации, Пермь, Россия

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ, ФОРМИРУЕМОЙ
В ЗОНЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ В ВАКУУМЕ**

Лазерная сварка в среде защитных газов нашла применение в промышленном производстве при изготовлении изделий различной номенклатуры. Однако эффективность процесса значительно снижается при поглощении части энергии лазерного луча плазменным факелом, формирующимся у поверхности металла в зоне сварки, а также в канале проплавления. Подобное негативное влияние в значительной мере может быть снижено проведением процесса лазерной сварки в вакууме. Лазерная сварка в вакууме позволяет достигнуть параметров проплавления, близких к параметрам проплавления, наблюдаемым при электронно-лучевой сварке, даже при низких степенях вакуумирования камеры сварочной установки. Оценка процессов над зоной лазерной сварки и в канале проплавления может производиться по параметрам вторично-эмиссионных сигналов, регистрируемых в процессе сварки. Плазменный факел при лазерной сварке в вакууме является проводящей средой для вторично-эмиссионного тока, что позволяет произвести оценку плазменного облака. Возникновение плазменного облака обуславливается ионизацией металлических паров при взаимодействии с мощным лазерным излучением. При этом ток, регистрируемый коллектором заряженных частиц, имеет колебательный характер. Оценка значений регистрируемого вторично-эмиссионного тока с использованием математического аппарата производилась после фильтрации с использованием прямого и обратного преобразования Фурье. Зафиксировано, что зависимость плотности среднего значения вторично-эмиссионного тока от напряжения между коллектором заряженных частиц и обрабатываемым изделием электронного тока имеет характер, близкий к линейному. Проведенные расчеты параметров плазмы показывают, что при приложении к электроду потенциала, равного потенциалу плазмы, происходит насыщение регистрируемого вторично-эмиссионного тока, связанное с полным отбором тока из плазмы.

Ключевые слова: лазерная сварка, сварка в вакууме, плазменный факел, ионизация металлических паров, вторично-эмиссионный сигнал, коллектор заряженных частиц, эмиссия электронов, плазменное облако, зонд Ленгмюра, концентрация и электронная температура плазмы, вольт-амперная характеристика.

I.Yu. Letyagin¹, K.V. Felikan¹, V.Ya. Belenkiy^{1,2}, A.P. Erikov²

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²Perm Military Institute of National Guard Troops of the Russian Federation, Perm, Russian Federation

**INVESTIGATION OF PARAMETERS OF PLASMA FORMED
IN THE ZONE OF LASER WELDING IN VACUUM**

Laser welding in a shielding gas has been applied in industry in the manufacture of products with different nomenclature. However, the efficiency of the process is significantly reduced when a part of the laser beam energy is absorbed by the plasma flame. A plasma flame is formed at the metal surface in the welding zone and also in the penetration channel. This negative effect can greatly be reduced performing laser welding process in a vacuum. Laser welding in vacuum makes it possible to achieve penetration parameters similar to parameters penetration observed in electron beam welding, even at low degrees of vacuumization of the welding machine chamber. Evaluation of processes above the laser welding zone and in the penetration channel can be carried out according to the parameters of the secondary emission signals recorded by the welding process. Plasma flame in laser welding in a vacuum is conductive medium secondary emission current. This makes it possible to evaluate the plasma cloud. The formation of a plasma cloud is caused by the ionization of metal vapors when interacting with high-power laser radiation. In this case, the current recorded by the collector of charged particles has an oscillatory character. The evaluation of the values of the registered secondary emission current using a mathematical apparatus was carried out after filtering the signals using the direct and inverse Fourier transforms. It is fixed that the dependence of the density of the average value of the secondary emission current on the voltage between the collector of charged particles and the processed product of the electron current has a character close to linear. Calculations of the plasma parameters show that when a potential equal to the plasma potential is applied to the electrode, the recorded secondary emission current is saturated, which is associated with the complete withdrawal of current from the plasma.

Keywords: laser welding, vacuum welding, plasma flame, metal vapor ionization, secondary emission signal, charged particle collector, electron emission, plasma cloud, Langmuir probe, plasma concentration and electron temperature, current-voltage characteristic.

Введение

Лазерная сварка в среде защитных газов с использованием мощных технологических лазеров находит все более широкое применение в промышленном производстве [1–5]. Однако при большой мощности лазерного луча поглощение его энергии плазменным факелом, формирующимся у поверхности металла в зоне сварки, существенно снижает эффективность термического воздействия лазерного луча на металл [6–8]. В связи с этим в последнее время во всем мире возрастает интерес к лазерной сварке в вакууме, которая по эффективности процесса не уступает широко используемой в промышленном производстве электронно-лучевой сварке и в то же время имеет ряд преимуществ, среди которых отсутствие воздействия на процесс сварки остаточных магнитных полей в свариваемом изделии и низкие требования к степени вакуумирования технологической камеры установки для лазерной сварки в вакууме [9–13].

Процессы формирования плазмы при воздействии мощного лазерного луча на металл при атмосферном давлении достаточно хорошо изучены [14–17]. При лазерной сварке в вакууме в зоне воздействия лазерного луча в результате ионизации паров металла также возникает плазма, которая, в отличие от плазменного факела при лазерной сварке в среде защитных газов, не поглощает энергию лазерного излучения и в то же время является проводящей средой для вторично-эмиссионного тока, возникающего в зоне лазерной сварки в вакууме в результате интенсивной термоэлектронной эмиссии из зоны воздействия лазерного луча на металл [18–22].

Формирование вторично-эмиссионного сигнала в зоне воздействия мощного лазерного луча на металл в вакууме представляет значительный интерес с точки зрения реализации оперативного контроля процесса лазерной сварки в вакууме [19–22]. Величина этого сигнала существенно зависит от условий токопрохождения в промежутке между свариваемым изделием и коллектором заряженных частиц, установленным над зоной сварки для регистрации вторично-эмиссионного сигнала. Однако до настоящего времени отсутствуют сведения о параметрах плазменного облака в зоне лазерной сварки в вакууме.

В соответствии с этим целью данной работы являлось исследование параметров плазмы в зоне воздействия лазерного луча на металл в вакууме и условий прохождения в ней вторично-эмиссионного тока, регистрируемого для осуществления контроля процесса лазерной сварки в вакууме.

Методика исследований

Исследование параметров плазмы производилось путем регистрации величины вторично-эмиссионного тока с помощью коллектора заряженных частиц, установленного над зоной воздействия лазерного луча на металл в вакууме и производящего отбор тока из плазмы, при изменении положительного потенциала коллектора. Регистрация вторично-эмиссионного тока осуществлялась путем создания внешней электрической цепи для зарядов плазмы. Эта цепь содержала регулируемый источник напряжения смещения на коллекторе, позволяющий изменять положительный потенциал коллектора в диапазоне 0–50 В, и резистор, падение напряжения на котором регистрировалось с помощью компьютерной информационно-измерительной системы, оснащенной аналого-цифровым интерфейсом на базе многоканального аналого-цифрового преобразователя E20-10 фирмы L-Card. Эксперименты проводились на установке для лазерной сварки ALFA-300, оснащенной технологической вакуумной камерой с окном из кварцевого стекла в верхней крышке камеры для ввода лазерного луча. В качестве материала обрабатываемого изделия использовалась аустенитная сталь марки 12X18H10T. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

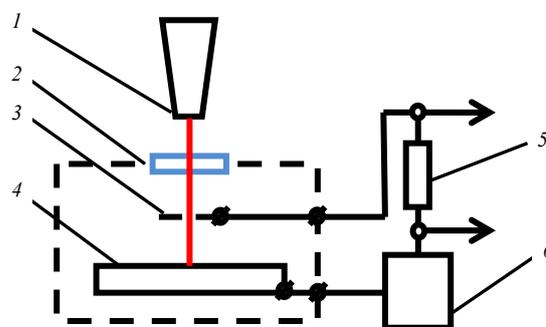


Рис. 1. Схема регистрации вторично-эмиссионного тока при лазерной сварке в вакууме: 1 – установка для лазерной сварки модели ALFA-300; 2 – вакуумная камера; 3 – коллектор заряженных частиц; 4 – свариваемое изделие; 5 – резистор нагрузки; 6 – источник напряжения смещения

Как известно [16], одним из основных факторов, вызывающих образование плазмы в зоне воздействия мощного лазерного луча на металл, является ионизация металлических паров при взаимодействии с мощным лазерным излучением за счет тормозного поглощения при взаимодействии электромагнитной волны со свободными электронами. Эмиссия этих электронов из металла происходит как в результате термоэлектронной эмиссии из нагретого лазерным лучом металла, так и за счет фо-

тоэлектронной эмиссии при поглощении металлом лазерного излучения. В этом случае коллектор заряженных частиц можно рассматривать как электрод, помещенный в «постороннюю» плазму, и анализировать вольт-амперную характеристику промежутка «коллектор – обрабатываемое изделие» как кривую тока на зонд Ленгмюра в плазме. По такой кривой, построенной в логарифмическом масштабе, могут быть рассчитаны концентрация и электронная температура плазмы с использованием выражений, справедливых для максвелловского распределения электронов по энергиям [23]:

$$T_e = \frac{e}{k} \left[\frac{d}{dU} (\ln j_p) \right]^{-1}; \quad (1)$$

$$n_e = \frac{j_{pm}}{e} \left(\frac{2\pi m_e}{kT_e} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где U – напряжение между изделиями, соприкасающимися с плазмой электродом; j_p – плотность регистрируемого тока в плазме, $j_p = I_p S^{-1}$; I_p – регистрируемый вторично-эмиссионный ток; S – площадь поверхности электрода (в данном случае – коллектора заряженных частиц), соприкасающегося с плазмой; j_{pm} – плотность тока насыщения (при потенциале электрода, равном потенциалу плазмы).

При воздействии мощного лазерного луча на металл в вакууме ток, регистрируемый коллектором заряженных частиц, имеет колебательный характер [22]. В соответствии с этим среднее значение (постоянная составляющая) этого тока определялось путем обработки файлов регистрации вторично-эмиссионного тока, записанных в процессе экспериментов, с использованием программы Mathcad. В процессе обработки записанный сигнал очищался от сопутствующих помех фильтрацией по частоте 50 Гц. Производилось прямое и обратное преобразование Фурье. Полученный отфильтрованный сигнал разбивался на участки. Для каждого участка определялись экстремумы с дальнейшим вычислением среднего значения амплитуды.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведена зависимость среднего значения вторично-эмиссионного тока, регистрируемого коллектором заряженных частиц в зоне воздействия лазерного луча на металл в вакууме, от напряжения между коллектором и изделием, построенная в полулогарифмическом масштабе $\ln I_p$ при изменении этого напряжения в диапазоне 5–30 В. Площадь коллектора заряженных частиц составляла 180 мм².

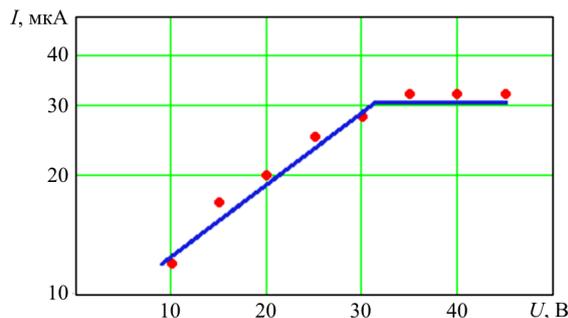


Рис. 2. Полулогарифмическая зависимость среднего значения вторично-эмиссионного тока от напряжения между обрабатываемым изделием и коллектором заряженных частиц

Эта зависимость анализировалась как электронная ветвь зондовой характеристики. Насыщение электронного тока из плазмы характеризует равенство потенциалов коллектора заряженных частиц, отбирающего ток из плазмы, и, таким образом, потенциал плазмы составляет величину 30–33 В.

Из графика видно, что зависимость плотности среднего значения вторично-эмиссионного тока от напряжения между коллектором заряженных частиц и обрабатываемым изделием электронного тока имеет характер, близкий к линейному. Однако тот факт, что вторично-эмиссионный сигнал практически отсутствует при положительном потенциале коллектора заряженных частиц величиной менее 4–8 В, свидетельствует о нарушении линейности кривой электронного тока и, соответственно, об отклонении функции распределения электронов по энергиям в плазме от максвелловской в области высоких энергий. Эти отклонения могут быть связаны с искажением параметров плазмы в результате отбора тока из плазмы на электрод-коллектор заряженных частиц или с наличием в функции распределения высокоэнергетического «хвоста». Тем не менее, как показано в работе [24], эффективную температуру электронов плазмы можно оценить и в случае отклонения функции распределения электронов по энергиям от максвелловской. При этом для оценки эффективной температуры плазмы должна использоваться часть электронной ветви зондовой характеристики, соответствующая потенциалам, близким к потенциалу плазмы.

В результате расчета параметров плазмы в зоне воздействия мощного концентрированного лазерного луча на металл в вакууме с использованием выражений (1) и (2) получено $T_e = 1,2 \cdot 10^{10}$ К и $n_e = 6 \cdot 10^9$ м⁻³. Следует отметить, что произведенные оценки носят качественный характер, так как коллектор заряженных частиц имеет значительную площадь соприкосновения с плазмой и производит

отбор тока, воздействуя на плазму и изменяя ее параметры. Высокие электронные температуры плазмы обусловлены в этой области нагревом в результате диссипации энергии при взаимодействии электромагнитной волны лазерного излучения со свободными электронами плазмы.

Приведенные результаты показывают, что применительно к условиям регистрации вторично-эмиссионного тока, формируемого термоэлектронной эмиссией в плазму при лазерной сварке в вакууме, коллектор заряженных частиц может рассматриваться как электрод, работающий в режиме зонда. Величина падения потенциала в слое пространственного заряда вблизи этого электрода определяется отношением плотности регистрируемого вторично-эмиссионного тока j_p к плотности полного тока из плазмы j [25]:

$$\Delta U = \frac{kT}{e} \ln \frac{j_p}{j}.$$

При приложении к электроду потенциала, равного потенциалу плазмы, происходит насыщение регистрируемого вторично-эмиссионного тока, связанное с полным отбором тока из плазмы.

Заключение

Исследование зависимости величины вторично-эмиссионного тока в плазме при лазерной сварке в вакууме от напряжения между коллектором заряженных частиц и обрабатываемым изделием, анализируемой как электронная ветвь вольт-амперной характеристики зонда Ленгмюра в плазме, позволило определить параметры плазмы, возникающей в зоне лазерной сварки в вакууме: концентрацию, электронную температуру и потенциал плазмы.

Список литературы

1. Gapontsev V.P. Fiber lasers burst a laser industry // Proc. of the 12th Int. Laser Physics Workshop (LPHYS'03), Hamburg, 25–29 August 2003. – Hamburg, 2003. – P. 53.
2. Holzer M., Rominger V., Havrilla D. Laser results in industrial welding of thick sheets with high power tridisk lasers and optimized peripheral components // Physics Procedia of Lasers in Manufacturing. – Munchen, 2010. – P. 296–301.
3. Schlueter H. Advances in industrial power lasers // Proc. SPIE. – 2005. – Vol. 5777. – P. 8–15.
4. Лазерная сварка в вакууме – перспективная сварочная технология изготовления изделий ответственного назначения / В.Я. Беленький, Д.Н. Трушников, Е.М. Федосеева [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2014. – Т. 16, № 4. – С. 71–81.

5. Letyagin I.Y., Trushnikov D.N., Belenkiy V.Y. Benefits and prospects of laser welding application in vacuum // IV Sino-Russian ASRTU Symp. on Advanced Materials and Processing Technology, KnE Materials Science, Ekaterinburg, Russian, 23–26 June 2016. – Ekaterinburg, Russian, 2016. – Vol. 2016. – P. 90–94.
6. Вайлер С. Дисковые лазеры для промышленности // Фотоника. – 2009. – № 3. – С. 10–13.
7. Spectral diagnostics of a vapor-plasma plume produced during welding with a high-power ytterbium fiber laser / V.N. Petrovskiy, N.M. Prokopova, P.Yu. Shcheglov [et al.] // Laser Phys. Lett. – 2010. – Vol. 7. – P. 396.
8. Воздействие лазерного излучения на материалы / Р.В. Арутюнян, В.Ю. Баранов, В.А. Большов [и др.]. – М.: Наука, 1989. – 367 с.
9. Fundamental phenomena during vacuum laser welding / Y. Arata, N. Abe, T. Oda, N. Tsujii // Proc. of ICALEO '85 Materials Processing Symp., San Francisco, California, USA, 1–14 November 1985 / Laser Inst. of America. – 1985. – Vol. 44. – P. 1–7.
10. Deep penetration welding with high-power laser under vacuum / S. Katayama, Y. Abe, M. Mizutani, Y. Kawahito // Transactions of JWRI. – 2011. – Vol. 40 (1). – P. 15–19.
11. Development of deep penetration welding technology with high brightness laser under vacuum / S. Katayama, A. Yohei, M. Mizutani, Y. Kawahito // Physics Procedia. – 2011. – Vol. 12. – P. 75–80.
12. Koleva E., Mladenov G., Vutova K. Calculation of weld parameters and thermal efficiency in electron beam welding // Vacuum. – 1999. – Vol. 53. – P. 67–70.
13. Лetyagin И.Ю., Беленький В.Я., Трушников Д.Н. О связи энергетических параметров вторично-эмиссионных сигналов из зоны лазерной сварки в вакууме с параметрами проплавления металла // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2017. – Т. 19, № 3. – С. 193–206.
14. Reigen U., Olschok S., Jakobs S. A comparison of electron beam welding with laser beam welding in vacuum // 9th Int. Conf. Beam Technology, Halle, Germany, 24–25 April, 2013. – Halle, Germany, 2013. – P. 7.
15. Исследование паро-плазменного факела при сварке мощным волоконным лазером / П.Ю. Щеглов, С.А. Успенский [и др.] // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2011: сб. науч. тр., г. Москва, 1–5 февраля 2011 г. – М., 2011. – Т. 2. – С. 90.
16. Исследование паро-плазменного сварочного факела при сварке мощным иттербиевым волоконным лазером / В.Н. Петровский, С.А. Успенский [и др.] // Ядерная физика и инжиниринг. – 2011. – Т. 2, № 2. – С. 159–165.
17. Fundamental study of laser plasma reduction method in high power CO₂ Laser / T. Ishide, S. Shono, T. Ohmae, H. Yoshida, A. Shinmi // Welding, Proc. of LAMP '87, HTSJ & JLPS, Osaka, (1097). – 1995. – Vol. 32-2. – P. 109–112.
18. On the connection between the energy parameters of secondary emission signals from the laser beam welding zone in vacuum with the parameters of metal penetration / I.Yu. Letyagin, V.Ya. Belenkiy, D.N. Trushnikov, S. Pang // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1109. – P. 9.

19. Исследование вторично-эмиссионных сигналов из зоны воздействия лазерного луча при лазерной сварке в вакууме / И.Ю. Летягин, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 106–114.

20. Secondary-emission signals in plasma above the laser beam affected zone during a vacuum laser welding / I.Yu. Letyagin, V.Ya. Belenkiy, D.N. Trushnikov, S. Pang, Ya.V. Lyamin // *Int. Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJTEE)*. – 2019. – Vol. 8, iss. 8. – P. 3241–3246.

21. Analysis of the amplitude-time parameters of current pulses in a plasma during laser beam welding / I.Yu. Letyagin, V.Ya. Belenkiy, D.N. Trushnikov, S. Pang // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 759 – Art. 012015. – 7 p.

22. Исследование процессов в зоне воздействия лазерного луча на металл при лазерной сварке в вакууме / И.Ю. Летягин, В.Я. Беленький, Я.В. Лямин, А.П. Ериков // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2019. – № 3. – С. 20–29.

23. Козлов О.В. Электрический зонд в плазме. – М.: Атомиздат, 1969. – 293 с.

24. Ершов А.П., Довженко В.А., Кузовников А.А. Об обработке вольт-амперных характеристик зонда Ленгмюра в немаксвелловской плазме. *Физика плазмы*. – 1981. – Т. 7, № 3. – С. 609–613.

25. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. – М.: Наука, 1971. – 512 с.

References

1. Gapontsev V.P. Fiber lasers burst a laser industry. *Proc. of the 12th Int. Laser Physics Workshop (LPHYS'03)*, Hamburg, 2003, p. 53.

2. Holzer M., Rominger V., Havrilla D. Laser results in industrial welding of thick sheets with high power trunk lasers and optimized peripheral components. *Physics Procedia of Lasers in Manufacturing*. Munchen, 2010, pp. 296–301.

3. Schlueter H. Advances in industrial power lasers. *Proc. SPIE*, 2005, vol. 5777, pp. 8–15.

4. Belen'kii V.Ia., Trushnikov D.N., Fedoseeva E.M. et al. Lazernaia svarka v vakuume – perspektivnaia svarochnaia tekhnologiya izgotovleniia izdelii otvetstvennogo naznacheniiia [Laser vacuum welding is a promising welding technology for the production of high-duty products]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2014, vol. 16, no. 4, pp. 71–81.

5. Letyagin I.Y., Trushnikov D.N., Belenkiy V.Y. Benefits and prospects of laser welding application in vacuum. *IV Sino-Russian ASRTU Symp. on Advanced Materials and Processing Technology, KnE Materials Science*. Ekaterinburg, Russian, 2016, vol. 2016, pp. 90–94.

6. Vailer S. Diskovye lazery dlia promyshlennosti [Disc lasers for industry]. *Fotonika*, 2009, no. 3, pp. 10–13.

7. Petrovskiy V.N., Prokopova N.M., Shcheglov P.Yu. Spectral diagnostics of a vapor-plasma plume produced during welding with a high-power ytterbium fiber laser. *Laser Phys. Lett.*, 2010, vol. 7, p. 396.

8. Arutiunian R.V., Baranov V.Iu., Bol'shov V.A. et al. [Vozdeistvie lazernogo izlucheniia na materialy [Effects of laser radiation on materials]. Moscow: Nauka, 1989, 367 p.

9. Arata Y., Abe N., Oda T., Tsujii N. Fundamental phenomena during vacuum laser welding. *Proc. of ICALOE '85 Materials Processing Symp., San Francisco, California, USA*. Laser Inst. of America, 1985, vol. 44, pp. 1–7.

10. Katayama S., Abe Y., Mizutani M., Kawahito Y. Deep penetration welding with high-power laser under vacuum. *Transactions of JWRI*, 2011, vol. 40 (1), pp. 15–19.

11. Katayama S., Yohei A., Mizutani M., Kawahito Y. Development of deep penetration welding technology with high brightness laser under vacuum. *Physics Procedia*, 2011, vol. 12, pp. 75–80.

12. Koleva E., Mladenov G., Vutova K. Calculation of weld parameters and thermal efficiency in electron beam welding. *Vacuum*, 1999, vol. 53, pp. 67–70.

13. Letiagin I.Iu., Belen'kii V.Ia., Trushnikov D.N. O sviazi energeticheskikh parametrov vtorichno-emissionnykh signalov iz zony lazernoi svarki v vakuume s parametrami propalvaniia metalla [On the Relation of Energy Parameters of Secondary Emission Signals from Vacuum Laser Welding Zone with Metal Fusion Parameters]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2017, vol. 19, no. 3, pp. 193–206.

14. Reigen U., Olschok S., Jakobs S. A comparison of electron beam welding with laser beam welding in vacuum. *9th Int. Conf. Beam Technology, Halle, Germany*, 2013, p. 7.

15. Shcheglov P.Iu., Uspenskii S.A. Issledovanie paro-plazmennogo fakela pri svarke moshchnym volokonnym lazerom [Investigation of the steam-plasma torch when welding with a high-power fiber laser]. *Nauchnaia sessiia NIiAU MIFI-2011*. Moscow, 2011, vol. 2, p. 90.

16. Petrovskii V.N., Uspenskii S.A. et al. Issledovanie paro-plazmennogo svarochnogo fakela pri svarke moshchnym ytterbiovym volokonnym lazerom [Investigation of the steam-plasma welding torch when welding with a high-power ytterbium fiber laser]. *Iadernaia fizika i inzhiniring*, 2011, vol. 2, no. 2, pp. 159–165.

17. Ishide T., Shono S., Ohmae T., Yoshida H., Shinmi A. Fundamental study of laser plasma reduction method in high power CO₂ Laser. *Welding, Proc. of LAMP '87, HTSJ & JLPS, Osaka, (1097)*, 1995, vol. 32-2, pp. 109–112.

18. Letyagin I.Yu., Belenkiy V.Ya., Trushnikov D.N., Pang S. On the connection between the energy parameters of secondary emission signals from the laser beam welding zone in vacuum with the parameters of metal penetration. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1109, p. 9.

19. Letiagin I.Iu., Trushnikov D.N., Belen'kii V.Ia. et al. Issledovanie vtorichno-emissionnykh signalov iz zony vozdeistviia lazernogo lucha pri lazernoi svarke v vakuume [19 Study of Secondary Emission Signals from the Laser Beam Effect Area during Laser Vacuum Welding]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 106–114.

20. Letyagin I.Yu., Belenkiy V.Ya., Trushnikov D.N., Pang S., Lyamin Ya.V. Secondary-emission signals in plasma above the laser beam affected zone during a vacuum

laser welding. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 2019, vol. 8, iss. 8, pp. 3241–3246.

21. Letyagin I.Yu., Belenkiy V.Ya., Trushnikov D.N., Pang S. Analysis of the amplitude-time parameters of current pulses in a plasma during laser beam welding. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 759 – Art. 012015, 7 p.

22. Letiagin I.Iu., Belen'kii V.Ia., Liamin Ia.V., Erikov A.P. Issledovanie protsessov v zone vozdeistviia lazernogo luch'a na metall pri lazernoi svarke v vakuume [Study of processes in the zone of laser beam influence on the metal during laser welding in vacuum]. *Vestnik Permskogo federal'nogo issledovatel'skogo tsentra*, 2019, no. 3, pp. 20–29.

23. Kozlov O.V. Elektricheskii zond v plazme [Electric probe in plasma]. Moscow: Atomizdat, 1969, 293 p.

24. Ershov A.P., Dovzhenko V.A., Kuzovnikov A.A. Ob obrabotke vol'tampnykh kharakteristik zonda Lengmiura v nemaksvellovskoi plazme [On the treatment of the volt-ampere characteristics of the Langmuir probe in a non-Maxwellian plasma. Plasma physics]. *Fizika plazmy*, 1981, vol. 7, no. 3, pp. 609–613.

25. Granovskii V.L. Elektricheskii tok v gaze [Electric current in gas]. Moscow: Nauka, 1971, 512 p.

Получено 14.01.2021

Опубликовано 29.03.2021

Сведения об авторах

Летягин Игорь Юрьевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: letyagin@pstu.ru.

Феликан Константин Владимирович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: felikan@yandex.ru.

Беленький Владимир Яковлевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; профессор Пермского военного института войск национальной гвардии Российской Федерации, e-mail: vladimirbelenkij@yandex.ru.

Ериков Алексей Петрович (Пермь, Россия) – доцент Пермского военного института войск национальной гвардии Российской Федерации, e-mail: yerikov@yandex.ru.

About the authors

Igor Yu. Letyagin (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: letyagin@pstu.ru.

Konstantin V. Felikan (Perm, Russian Federation) – Graduate Student, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: felikan@yandex.ru

Vladimir Ya. Belenkiy (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; Professor, Perm Military Institute of National Guard Troops of the Russian Federation, e-mail: vladimirbelenkij@yandex.ru.

Aleksei P. Erikov (Perm, Russian Federation) – Associate Professor, Perm Military Institute of National Guard Troops of the Russian Federation, e-mail: yerikov@yandex.ru.