

DOI: 15593/2224-9877/2017.3.12

УДК 621.791

И.Ю. Летягин, В.Я. Беленький, Д.Н. ТрушниковПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**О СВЯЗИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННЫХ СИГНАЛОВ
ИЗ ЗОНЫ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ В ВАКУУМЕ
С ПАРАМЕТРАМИ ПРОПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА**

В настоящее время лазерная сварка широко применяется в машиностроении, особенно в производстве изделий ответственного назначения. Реализация процессов лазерной сварки в производстве дает такие преимущества, как высокая концентрация теплового воздействия, высокие скорости роста и уменьшения температуры в зоне обработки, а также возможность быстрого образования сварной ванны в заданном объеме.

В последние годы активное развитие в лазерных технологиях при изготовлении изделий общего и специального машиностроения получила сварка концентрированным лазерным лучом в вакууме, которая позволяет получить бездефектные сварные швы с высоким показателем отношения глубины шва к его ширине. Ранее данные показатели качества можно было наблюдать только при применении электронно-лучевой сварки. Исследования физических процессов, протекающих при лазерной сварке в вакууме, с целью создания эффективных сварочных технологий в настоящее время только начинаются. Одним из направлений исследований является возможность оперативного контроля процесса формирования сварного шва с целью обеспечения отсутствия дефектов и высокой воспроизводимости качества сварных соединений. Предлагаемая методика основана на регистрации вторично-эмиссионных сигналов над зоной сварки с использованием коллектора заряженных частиц. Полученные при данной регистрации амплитудно-временные характеристики могут быть использованы для оценки величины удельной мощности, вводимой в свариваемое изделие. Изменение удельной мощности фиксировалось в ходе экспериментов при изменении фокуса лазерного луча относительно обрабатываемой поверхности, что позволяет сделать вывод об изменении эмиссионной способности из сварочной ванны. Использование данной методики регистрации вторично-эмиссионного тока, регистрируемого в плазме над зоной лазерной сварки в вакууме, обеспечивает возможность оперативного контроля геометрии зоны проплавления при лазерной сварке в вакууме.

Ключевые слова: лазерная сварка в вакууме, изотропная плазма, фокусировка лазерного луча, удельная мощность, коллектор сигналов, вторично-эмиссионный сигнал, амплитудно-временные характеристики, оперативный контроль проплавления, формирование сварного шва, геометрия зоны проплавления.

I.Yu. Letyagin, V.Ya. Belenkiy, D.N. Trushnikov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

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

Currently, laser beam welding is widely used in engineering, especially in the production of responsible appointment. The implementation process of laser beam welding in the production gives such advantages as a high concentration of thermal effects, high growth rate and reducing the temperature in the processing zone, and the possibility of rapid formation of a welded bath in a given volume.

In recent years, active development in laser beam technologies in the manufacture of general and special machine building products has been obtained by welding with a concentrated laser beam in a vacuum, which allows producing defect-free welds with a high seam depth to width ratio. Previously, these quality indicators could be observed only with the use of electron beam welding. Studies of physical processes during laser beam welding in a vacuum, in order to create efficient welding technology, is now just beginning. One of the research areas is the possibility of operative control of the process of formation of a welded seam, in order to ensure the absence of defects and high reproducibility of the quality of welded joints. The proposed method is based on registration of secondary emission signals of the welding zone with the use of a collector of charged particles. The amplitude-time characteristics obtained for the given registration can be used to estimate the value of the specific power introduced into the article to be welded. The change in the specific power was recorded during the experiments with a change in the focus of the laser beam relative to the surface being treated, which makes it possible to conclude that the emissivity has changed from the weld pool. The use of this technique for recording the secondary emission current recorded in the plasma over the laser welding zone in a vacuum provides the possibility of an operative control of the geometry of the penetration zone during laser welding in vacuum.

Keywords: laser beam welding in vacuum, isotropic plasma, laser beam focusing, specific power, signal collector, secondary emission signal, amplitude-time characteristics, operative control of penetration, formation of welded seam, geometry of penetration zone.

Лазерная сварка металлов в вакууме является перспективной технологией, которая, несмотря на необходимость размещения свариваемых деталей в технологической вакуумной камере, позволяет получить по сравнению с лазерной сваркой в среде защитных газов существенно большую глубину проплавления металла при той же мощности лазерного луча и обеспечить высокую степень защиты зоны сварки от воздействия внешней среды [1–3]. Технологические возможности лазерной сварки в вакууме сопоставимы, а в ряде случаев и превосходят возможности электронно-лучевой сварки, которая также позволяет обеспечить высокую концентрацию мощности в зоне сварки и уже в течение многих десятилетий является высокоэффективным способом соединения деталей из сложнолегированных конструкционных сталей

и сплавов в аэрокосмической и других высокотехнологичных отраслях промышленности.

Изготовление ответственных изделий с использованием сварки в ряде случаев требует осуществления оперативного контроля процесса формирования сварного шва, что позволяет избежать дефектов в шве и обеспечить высокую воспроизводимость качества сварных соединений. При электронно-лучевой сварке широко применяются вторично-эмиссионные способы контроля процесса взаимодействия электронного луча с металлом, при которых регистрируются параметры электронных потоков, покидающих зону сварки [4, 5].

При лазерной сварке в вакууме использование вторично-эмиссионных сигналов для контроля процесса формирования сварного шва также представляет значительный интерес, так как в зоне воздействия мощного концентрированного лазерного луча протекают схожие с электронно-лучевой сваркой процессы, среди которых можно выделить термоэлектронную эмиссию из конденсированной фазы металла в зоне энерговыделения, формирование низкотемпературной плазмы над зоной сварки и наличие колебательных газо- и гидродинамических процессов в широкой спектральной области [4].

При лазерной сварке с глубоким проплавлением процесс взаимодействия лазерного луча с металлом носит взрывной характер, а энергия, вводимая в металл лазерным лучом, превышает затраты энергии на его взрывное разрушение. При этом некоторая часть энергии лазерного луча переходит во внутреннюю энергию плазменной фазы в зоне разрушения, и формирование интенсивных импульсов тока в плазме над зоной воздействия лазерного луча можно рассматривать как процесс прямого преобразования тепловой энергии в электрическую [6–10].

Таким образом, целью проводимых исследований было подтверждение связи энергетических характеристик вторично-эмиссионных сигналов из зоны лазерной сварки в вакууме с удельной мощностью лазерного луча и, как следствие, геометрией зоны проплавления.

Известно, что главным источником электродвижущей силы в этом процессе преобразования энергии является тепловая энергия продуктов разрушения металла. В соответствии с этим наиболее полная информация об энергетических характеристиках процесса взрывного разрушения металла в зоне воздействия лазерного луча при лазерной

сварке в вакууме может быть получена при анализе амплитудно-временных параметров импульсов тока в плазме с частотой порядка 10^4 Гц, отражающих процесс взрывного разрушения метастабильной конденсированной фазы металла [11–14]. При этом необходимо дифференцировать эти колебания и колебания, связанные с возникновением ионно-звуковых и потенциально-релаксационной неустойчивостей, которые наблюдаются в низкотемпературной изотропной плазме, как и при регистрации вторично-эмиссионных сигналов в процессе электронно-лучевой сварки [14]. Оба вида неустойчивости имеют схожую природу возбуждения и распространения и возникают в плазме при превышении плотности протекающего в ней тока некоторой критической величины.

Амплитудно-временные параметры импульсов вторично-эмиссионного тока в плазме определяют энергию этих импульсов на единичном сопротивлении:

$$E_i = \int_0^t I^2(t) dt = \psi I_m^2 t, \quad (1)$$

где t – длительность импульса; ψ – коэффициент формы импульса тока $I(t)$ в нагрузке; I_m – амплитуда импульса тока.

Промежуток «свариваемое изделие – коллектор заряженных частиц», где коллектор заряженных частиц является электродом, отбрасывающим ток из плазмы, может быть рассмотрен в качестве нелинейного активного двухполюсника в цепи регистрации вторично-эмиссионного тока, а внешние источники электродвижущей силы – как факторы, изменяющие распределение потенциала в слоях пространственного заряда, отделяющих плазму от соприкасающихся с ней электродов, и определяющие условия прохождения вторично-эмиссионного тока в плазме. Тогда импульсы вторично-эмиссионного тока в плазме над зоной лазерной сварки в вакууме с частотой порядка 10^4 Гц в нагрузке измерительной цепи могут рассматриваться как импульсы термоэлектродвижущей силы, генерируемой при тепловом взрыве конденсированной фазы металла в зоне воздействия лазерного луча. Энергия этих импульсов пропорциональна тепловой энергии Q , выделяемой продуктами разрушения металла:

$$E_i = \eta Q, \quad (2)$$

где η – коэффициент полезного действия, учитывающий термодинамические потери и потери в электрической цепи и составляющий, применительно к условиям регистрации вторично-эмиссионного тока в плазме над зоной лазерной сварки в вакууме, величину 0,1–0,01 %.

Энергия, выделяемая при тепловом взрыве конденсированной фазы металла, определяется в адиабатическом приближении величиной избыточной энтальпии перегретого металла

$$Q = mc(T - T_0), \quad (3)$$

где m – масса перегретого металла, подвергаемого взрывному разрушению; c – удельная теплоемкость конденсированной фазы металла; T – температура металла в момент, предшествующий взрывному разрушению; T_0 – температура кипения металла.

Масса металла, разрушающегося при воздействии лазерного луча,

$$m = qL^{-1}\tau, \quad (4)$$

где q – мощность, выделяемая лазерным лучом; L – удельная энергия разрушения; τ – время энергонакопления, в течение которого температура повышается от T_0 до T .

Нагрев металла лучом лазера большой мощности вызывает значительный перегрев металла выше температуры кипения, величина которой определяется скоростью нарастания температуры металла. Эту скорость можно оценить, пренебрегая потерями на теплопроводность, по формуле

$$\frac{dT}{dt} \cong \frac{q_s}{c\rho\delta}, \quad (5)$$

где q_s – удельная мощность лазерного луча в зоне энерговыделения; ρ – плотность конденсированной фазы металла; δ – глубина слоя перегретого металла.

Если аппроксимировать зависимость величины перегрева от скорости нарастания температуры степенной функцией

$$T - T_0 \cong \alpha \left(\frac{dT}{dt} \right)^\gamma, \quad (6)$$

где α и γ – постоянные коэффициенты, а T ограничена сверху температурой спинодали, определяющей предельное устойчивое состояние ме-

тастабильной жидкости, то из выражений (5) и (6), с учетом приближенной постоянной скорости нарастания температуры в температурном интервале перегрева, следует

$$T - T_0 \cong \alpha \left(\frac{q_s}{c\rho\delta} \right), \quad (7)$$

$$\tau \cong \alpha \left(\frac{q_s}{c\rho\delta} \right)^{\gamma-1}. \quad (8)$$

Тогда энергия, выделяемая при взрывном разрушении металла в зоне воздействия лазерного луча в вакууме, приближено равна

$$Q \cong \frac{\alpha^2 c q}{L} \left(\frac{q_s}{c\rho\delta} \right)^{2\gamma-1}, \quad (9)$$

и взаимосвязь энергии импульсов вторично-эмиссионного тока, регистрируемого в плазме над зоной лазерной сварки в вакууме, и удельной мощности лазерного луча при постоянном значении полной мощности определяется выражением

$$E_i \cong A q_s^{2\gamma-1}, \quad (10)$$

где A – постоянный коэффициент, $A \cong \frac{\alpha^2 c q \eta}{L} (c\rho\delta)^{1-2\gamma}$.

Для оценки значения степенного параметра γ было проведено экспериментальное исследование взаимосвязи энергии импульсов вторично-эмиссионного тока, регистрируемого в плазме над зоной лазерной сварки в вакууме, и удельной мощности лазерного луча при воздействии лазерного луча на плоские образцы толщиной 4 мм из стали 12Х18Н10Т. С целью уменьшения отражающей способности зачистка поверхности образцов не проводилась. Для экспериментов использовалась установка ALFA-300 с варьированием максимального напряжения накопителя от 200 до 400 В, длительностью импульсов от 4 до 20 мс, частотой следования импульсов 1 Гц.

Для контроля процесса взаимодействия лазерного луча с металлом при лазерной сварке в вакууме по параметрам вторично-эмиссионных сигналов над зоной сварки был установлен коллектор заряженных частиц (рис. 1), на который подавался положительный потен-

циал, и создавалась внешняя электрическая цепь для регистрации тока, протекающего в плазме, формирующейся над зоной сварки [15, 16].

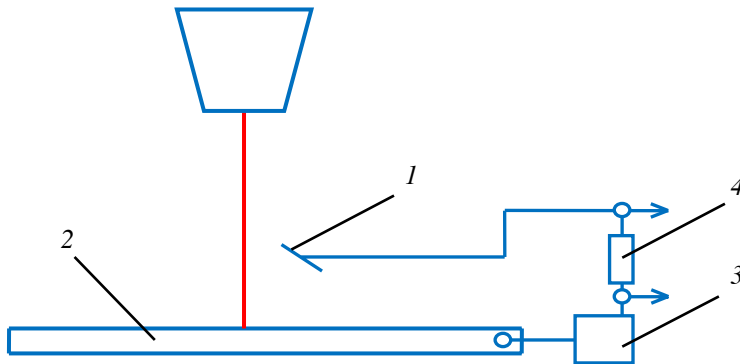


Рис. 1. Схема регистрации вторично-эмиссионного тока при лазерной сварке: 1 – коллектор заряженных частиц; 2 – свариваемое изделие; 3 – источник напряжения смещения; 4 – резистор нагрузки

В ходе экспериментов проводилось изменение точки фокусировки лазерного излучения в пределах $\pm 1,6$ мм, что приводило к изменению удельной мощности лазерного луча. Удельную мощность лазерного луча вычисляли в значениях, приближенных к ее равномерному распределению, по диаметру пучка, который определяли путем прожигания фольги при импульсном воздействии лазерного луча. Для определения усредненных значений энергии импульсов по формуле (1) использовались полученные в ходе экспериментов средние значения амплитуды и частоты импульсов вторично-эмиссионного тока, при этом средняя длительность импульса принималась приблизительно равной $t \cong 0,5f^{-1}$, где f – средняя частота колебаний.

На рис. 2 приведен график зависимости энергии импульсов вторично-эмиссионного тока, регистрируемого коллектором заряженных частиц, от величины удельной мощности лазерного луча. Как видно из графика, в первом приближении зависимость энергии импульсов вторично-эмиссионного тока является пропорциональной, и величина степенного параметра в выражении (10) может быть принята $\gamma \cong 1$.

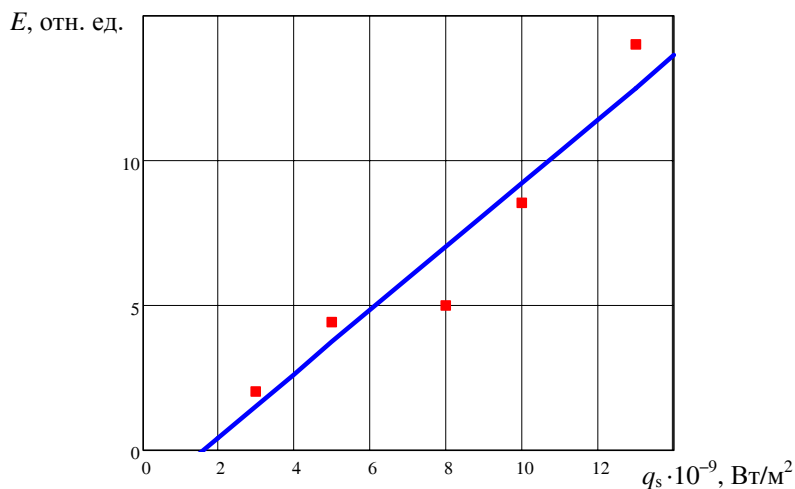


Рис. 2. Зависимость энергии импульсов вторично-эмиссионного тока от величины удельной мощности лазерного луча

При заглаблении фокуса лазерного луча в изделие наблюдается изменение как значений амплитудно-временных характеристик, так и их частотного распределения (рис. 3, 4). Данный процесс может быть объяснен увеличением взрывного разрушения металла в сварочной ванне и усилением эмиссии электронов из зоны воздействия на металл лазерного излучения [17, 18].

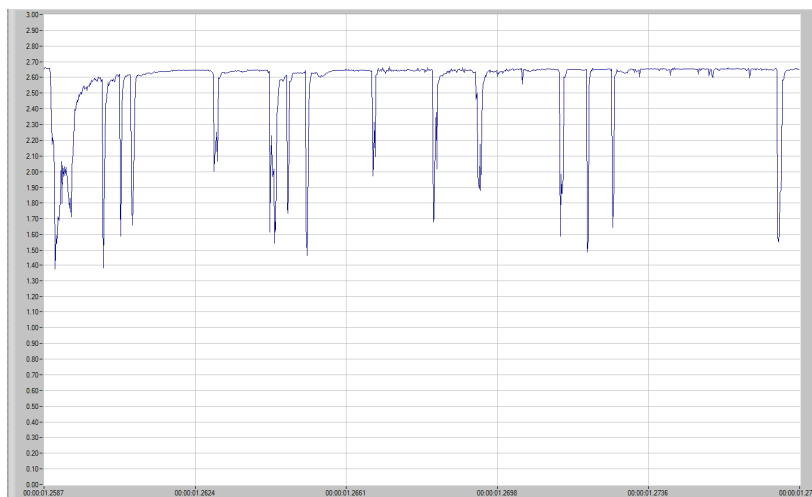


Рис. 3. Регистрируемый вторично-эмиссионный сигнал при смещении фокуса вглубь изделия на 0,4 мм

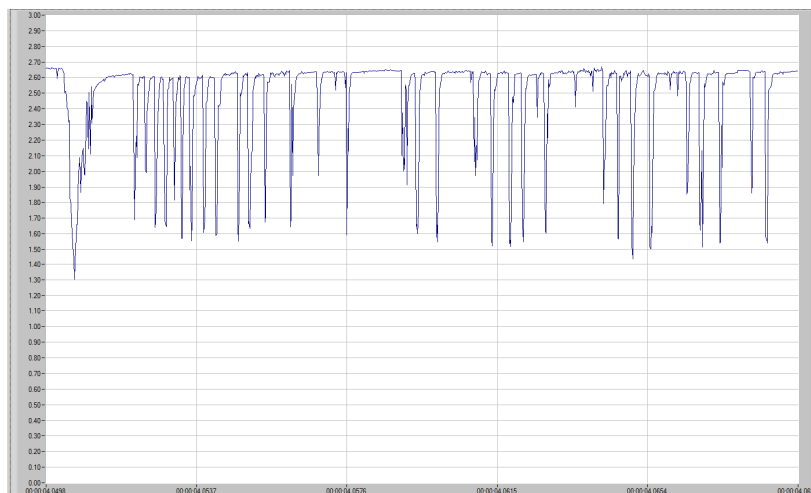


Рис. 4. Регистрируемый вторично-эмиссионный сигнал при смещении фокуса вглубь изделия на 0,6 мм

Анализ амплитудно-временных характеристик показал увеличение количества регистрируемых пиков вторично-эмиссионного тока, что подтверждает увеличение эмиссии из плазменной фазы в зоне разрушения. В спектре регистрируемого сигнала присутствует высокочастотная составляющая ($f > 10$ кГц) и ее гармоники. Эта составляющая вторичного тока в плазме, измеряемого с помощью коллектора, находящегося под положительным потенциалом, отражает автоколебательные процессы в столбе плазмы при возбуждении в нем несамостоятельного разряда. Величина сигнала возрастает при увеличении величины заглубления фокуса лазерного луча в изделие. Природа этих автоколебательных процессов связана с возникновением ионно-звуковой неустойчивости. При этом наблюдаемая неустойчивость аналогична потенциально-релаксационной неустойчивости, характеризующейся большой амплитудой колебаний на положительном электроде, расположенном в плазме. Оба вида неустойчивости имеют схожую природу возбуждения и распространения. Возникающие автоколебания в плазме над зоной сварки модулируют осцилляции в спектре вторичного сигнала в диапазоне от 100 Гц до 10 кГц, вызванные капиллярными неустойчивостями канала проплавления, стохастическим перемещением зоны взаимодействия лазерного луча с металлом на стенках канала проплавления, локальными перегревами в канале проплавления, пуль-

сациями потоков паров из канала проплавления и другими периодическими процессами в канале проплавления.

Экспериментальные исследования зависимости коэффициента формы зоны проплавления (отношения глубины зоны к ее ширине) от удельной мощности лазерного луча показали, что эта зависимость в первом приближении близка к линейной (рис. 5).

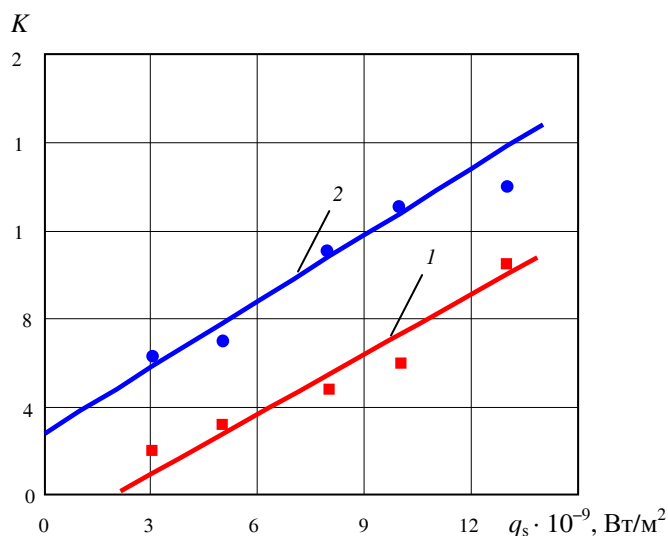


Рис. 5. Зависимость коэффициента формы зоны проплавления от удельной мощности лазерного луча: 1 – заглупление фокуса 0,4 мм, 2 – заглупление фокуса 0,6 мм

Таким образом, энергия импульсов в первом приближении пропорциональна отношению глубины зоны проплавления к ее ширине. Это позволяет осуществить оперативный контроль геометрии зоны проплавления при лазерной сварке в вакууме по амплитудно-временным параметрам импульсов вторично-эмиссионного тока, регистрируемого в плазме над зоной лазерной сварки в вакууме.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-48-590208).

Список литературы

1. Лetyagin И.Ю. Технологические перспективы лазерной сварки в вакууме // Сварка и родственные технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., 22–23 ноября 2016 г. – Екатеринбург, 2016. – С. 6–7.
2. Лазерная сварка в вакууме – перспективная сварочная технология изготовления изделий ответственного назначения / В.Я. Беленький, Д.Н. Трушников, И.Ю. Лetyagin [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2014. – Т. 16, вып. 4. – С. 71–81.
3. Letyagin I.Yu., Belenkiy V.Ya., Trushnikov D.N. Benefits and prospects of laser welding application in vacuum // IV Sino-Russian ASRTU Symposium on Advanced Materials and Processing Technology: ASRTU conf. proc. – Dubai: Knowledge E Engaging minds, 2016. – URL: <http://knepublishing.com/index.php/KnE-Materials/article/view/568/1818> (дата обращения: 20.06.2017).
4. Trushnikov D.N., Belenkiy V.Ya., Salomatova E.S. Formation of a secondary current signal in electron beam welding of dissimilar materials // Global Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2016. – Vol. 12, № 1. – С. 657–676.
5. Беленький В.Я., Трушников Д.Н. Исследование формирования сигнала вторичного тока в плазме при электронно-лучевой сварке с осцилляцией электронного пучка // Сварочное производство. – 2012. – № 11. – С. 9–13.
6. Гуреев Д.М., Ямщиков С.В. Основы физики лазеров и лазерной обработки материалов: учеб. пособие. – Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2001. – 392 с.
7. Виноградов Б.А., Гавриленко В.Н., Либенсон М.Н. Теоретические основы воздействия лазерного излучения на материалы. – Благовещенск: Изд-во Благовещ. политехн. ин-та, 1993. – 344 с.
8. Зуев И.В. Обработка материалов концентрированными потоками энергии. – М.: Изд-во МЭИ, 1997. – 437 с.
9. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 592 с.
10. Мартынюк М.М. Фазовые переходы при импульсном нагреве. – М.: Изд-во РУДН, 1999. – 332 с.
11. Криштал М.А., Жуков А.А., Кокора А.Н. Структура и свойства сплавов, обработанных излучением лазера. – М.: Металлургия, 1973. – 192 с.
12. Трушников Д.Н. Изучение физических процессов при электронно-лучевой сварке по параметрам вторичного тока в плазме // Физика и химия обработки материалов. – 2015. – № 5. – С. 36–45.
13. Letyagin I.Yu., Trushnikov D.N., Belenkiy V.Ya. The studies of plasma torch processes by laser beam welding // Mechanical Engineering, Materials Science and Civil Engineering IV (4th ICMEMSCE): sel., peer rev. papers from the 4th Intern. Conf. on Mechanical Engineering, Materials Science and Civil Engineering (ICMEMSCE 2016), November 19–20, 2016, Sanya, China / ed. J. Zhao. – Pfaffikon: Trans Tech Publications Inc., 2017. – Vol. 893. – P. 190–194. URL: <https://www.scientific.net/MSF.893.190.pdf> (дата обращения: 20.06.2017).
14. Лetyagin И.Ю., Федосеева Е.М. Оценка сквозного проплавления при лазерной сварке на основе регистрации плазменного факела // Вестник Пермского нацио-

нального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т. 18, № 1. – С. 84–100.

15. Веденов А.А., Гладуш Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 208 с.

16. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.

17. Миркин Л.И. Физические основы обработки материалов лучами лазера. – М.: Изд-во МГУ, 1975. – 383 с.

18. Янчук Л.М., Зуев И.В., Углов А.А. О влиянии степени заглубления фокуса в материал на параметры проплавления при электронно-лучевой сварке // Сварочное производство. – 1974. – № 12. – С. 3–4.

References

1. Letiagin I.Iu. Tekhnologicheskie perspektivy lazernoi svarki v vakuume [The technological prospects of laser welding in a vacuum]. *Svarka i rodstvnyye tekhnologii: materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, 22–23 noiabria 2016 g. Ekaterinburg*, 2016, pp. 6–7.

2. Belen'kii V.Ia., Trushnikov D.N., Letiagin I.Iu. at al. Lazernaia svarka v vakuume – perspektivnaia svarochnaia tekhnologiia izgotovleniia izdelii otvetstvennogo naznachenii [Laser welding in a vacuum – perspective welding manufacturing techniques of products of responsible appointment] *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*. 2014, vol. 16, iss. 4, pp. 71–81.

3. Letyagin I.Yu., Belenkiy V.Ya., Trushnikov D.N. Benefits and pro-spects of laser welding application in vacuum. *IV Sino-Russian ASRTU Symposium on Advanced Materials and Processing Technology: ASRTU conf. proc. Dubai: Knowledge E Engaging minds, 2016*. Available at: <http://knepublishing.com/index.php/KnE-Materials/article/view/568/1818> (accessed 20 june 2017).

4. Trushnikov D.N., Belenkiy V.Ya., Salomatova E.S. Formation of a secondary current signal in electron beam welding of dissimilar materials. *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2016, vol. 12, no. 1, pp. 657–676.

5. Belen'kii V.Ia., Trushnikov D.N. Issledovanie formirovaniia signala vtorichnogo toka v plazme pri elektronno-luchevoi svarke s ostsilliatsiei elektronnogo puchka [Research of formation of a signal of secondary current in plasma at electron beam welding with oscillation of an electron beam]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2012, no. 11, pp. 9–13.

6. Gureev D.M., Iamshchikov S.V. Osnovy fiziki lazerov i lazernoi obrabotki materialov [Fundamentals of physics of lasers and laser processing of materials]. Uchebnoe posobie. Samara: Izdatel'stvo Samarskogo univerchiteta, 2001, 392 p.

7. Vinogradov B.A., Gavrilenko V.N., Libenson M.N. Teoreticheskie osnovy vozdeistviia lazernogo izlucheniia na materialy [Theoretical bases of impact of laser radiation on materials]. Blagoveshchensk: Izdatel'stvo Blagoveshchenskogo politekhicheskogo instituta, 1993, 344 p.

8. Zuev I.V. Obrabotka materialov kontsentririvannymi potokami energii [Processing of materials the concentrated energy streams]. Moscow: Izdatel's'vo Moskovskogo energeticheskogo instituta, 1997, 437 p.

9. Raizer Iu.P. Fizika gazovogo razriada [Physics of the gas category]. Moscow: Nauka, 1987, 592 p.

10. Martyniuk M.M. Fazovye perekhody pri impul'snom nagreve [Phase transitions at pulse heating]. Moscow: Izdatel'stvo Rossiiskogo universiteta druzhby narodov, 1999, 332 p.

11. Krishtal M.A., Zhukov A.A., Kokora A.N. Struktura i svoistva splavov, obrabotannykh izlucheniem lazera [Structure and properties of the alloys processed by radiation the laser]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 192 p.

12. Trushnikov D.N. Izuchenie fizicheskikh protsessov pri elektronno-luchevoi svarke po parametram vtornichnogo toka v plazme [Studying of physical processes at electron beam welding in parameters of secondary current in plasmas]. *Fizika i khimiia obrabotki materialov*, 2015, no. 5, pp. 36–45.

13. Letyagin I.Yu., Trushnikov D.N., Belenkiy V.Ya. The studies of plasma torch processes by laser beam welding. *Mechanical Engineering, Materials Science and Civil Engineering IV (4th ICMEMSCE): sel., peer rev. papers from the 4th Intern. Conf. on Mechanical Engineering, Materials Science and Civil Engineering (ICMEMSCE 2016), November 19–20, 2016, Sanya, China / ed. J. Zhao*. Pfaffikon: Trans Tech Publications Inc., 2017, vol. 893, pp. 190–194, available at: <https://www.scientific.net/MSF.893.190.pdf> (accessed 20 June 2017).

14. Letiagin I.Iu., Fedoseeva E.M. Otsenka skvoznoogo proplavleniia pri lazernoi svarke na osnove registratsii plazmennogo fakela [Оценка сквозного проплавления при лазерной сварке на основе регистрации плазменного факела]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2016, vol. 18, no. 1, pp. 84–100.

15. Vedenov A.A., Gladush G.G. Fizicheskie protsessy pri lazernoi obrabotke materialov [Physical processes at laser processing of materials]. Moscow: Energoatomizdat, 1985, 208 p.

16. Grigor'iants A.G. Osnovy lazernoi obrabotki materialov [Bases of laser processing of materials]. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 304 p.

17. Mirkin L.I. Fizicheskie osnovy obrabotki materialov luchami lazera [Physical bases of processing of materials laser beams]. Moscow: Izdatel'stvo moskovskogo gosudarstvennogo universiteta, 1975, 383 p.

18. Ianchuk L.M., Zuev I.V., Uglov A.A. O vliianii stepeni zaglublenniia fokusa v material na parametry proplavleniia pri elektronno-luchevoi svarke [About influence of extent of deepening of focus in material on promelting parameters at electron beam welding]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1974, no. 12, pp. 3–4.

Получено 4.07.2017

Об авторах

Летягин Игорь Юрьевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Перм-

ского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: letyagin@pstu.ru.

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

Трушников Дмитрий Николаевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: trdimitr@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.

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; vladimirbelenkij@yandex.ru.

Dmitriy N. Trushnikov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: trdimitr@yandex.ru.