

Летягин И.Ю., Трушников Д.Н., Беленький В.Я., Панг Ш., Лямин Я.В. Исследование вторично-эмиссионных сигналов из зоны воздействия лазерного луча при лазерной сварке в вакууме // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 106–114. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.12

Letyagin I.Yu., Trushnikov D.N., Belenkii V.Ya., Pang Shengyong, Lyamin Ya.V. Investigation of secondary emission signals from the impact zone of the laser beam during laser beam welding in vacuum. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 106–114. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.12

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 20, № 3, 2018
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.12
УДК 621.791

И.Ю. Летягин¹, Д.Н. Трушников¹, В.Я. Беленький¹, Ш. Панг², Я.В. Лямин¹

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

² Хуачжунский университет науки и технологии, Ухань, Китайская Народная Республика

ИССЛЕДОВАНИЕ ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННЫХ СИГНАЛОВ
ИЗ ЗОНЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА
ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ В ВАКУУМЕ

Разработка и совершенствование лазерного оборудования, применяемого для сварки, позволяет увеличить долю лазерной сварки в технологических процессах, особенно для получения высококачественных соединений. Существующая проблема поглощения части мощности лазерного луча плазменным облаком при лазерной сварке с глубоким проплавлением может быть решена использованием лазерной сварки в вакууме. Лазерная сварка в вакууме по сравнению с лазерной сваркой в среде защитных газов позволяет получить значительно большую глубину проплавления при той же мощности лазерного луча, а также обеспечивает эффективную защиту зоны сварки от воздействия внешней среды, что является особенно важным при сварке активных металлов. Таким образом, необходимо изучение процессов в плазменном облаке, которое образуется над зоной воздействия лазерного луча на металл. Исследование вторично-эмиссионных процессов в плазме в зоне воздействия лазерного луча на металл в вакууме позволило провести численное моделирование процессов при лазерной сварке в зависимости от фокусировки лазерного луча и других технологических параметров лазерной сварки в вакууме, а также регистрацию вторично-эмиссионного тока с целью контроля геометрических параметров проплавления при лазерной сварке. Варьирование давления в вакуумной камере подтвердило столкновительный механизм затухания колебаний вторично-эмиссионного тока. Регистрация вторично-эмиссионных сигналов ионного тока представляет особый интерес, поскольку регистрируемые параметры сигнала не связаны с возбуждением плазменных автоколебаний и, следовательно, величина ионного тока непосредственно отражает колебания плотности истекающих из канала паров металла. Данная методика может быть использована при построении методов оперативного контроля процесса сварки.

Ключевые слова: лазерная сварка в вакууме, численное моделирование, плазма, зона сварки, электронный ток, ионный ток, вторично-эмиссионный сигнал, амплитудно-временные характеристики, автоколебательные процессы, плазменное облако над зоной лазерной сварки, спектр колебаний вторично-эмиссионного тока, оперативный контроль проплавления.

I.Yu. Letyagin¹, D.N. Trushnikov¹, V.Ya. Belenkii¹, Shengyong Pang², Ya.V. Lyamin¹

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

² Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China

INVESTIGATION OF SECONDARY EMISSION SIGNALS FROM
THE IMPACT ZONE OF THE LASER BEAM DURING LASER BEAM WELDING
IN VACUUM

Development and improvement of laser equipment used for welding, makes it possible to increase the proportion of laser welding processes. This is necessary to obtain high-quality connections. There is a problem of absorbing of part of the laser beam power by a plasma cloud during laser welding with deep penetration. The problem can be solved by using laser welding in a vacuum. Laser welding in vacuum makes it possible to obtain much more penetration depth at the same power of the laser beam as compared to laser welding in a protective gas environment. Laser welding in vacuum also provides effective protection of the welding zone from the external environment, which is especially important when welding active metals. It is necessary to study the processes in a plasma cloud formed above the zone of action of a laser beam on a metal. The study of secondary emission processes in the plasma in the zone of action of a laser beam on a metal in a vacuum made it possible to carry out a numerical simulation of processes in laser welding, depending on the focusing of the laser beam and other technological parameters of laser welding in vacuum. In the course of the study, a secondary emission current was recorded in order to control the geometric parameters of penetration during laser welding. Varying the pressure in the vacuum chamber confirmed the collisional mechanism of damping of secondary-emission current oscillations. Register secondary emission of the ion current signal is of particular interest because the parameters recorded signal is not

related to the excitation of plasma oscillations. Consequently, the magnitude of the ion current directly reflects the fluctuations in the density of metal vapors flowing out of the channel. This technique can be used in the construction of methods for the operational control of the welding process.

Ключевые слова: laser welding in vacuum, numerical simulation, plasma, welding zone, electron current, ion current, secondary-emission signal, amplitude-time characteristics, autooscillatory processes, plasma cloud above the laser welding zone, spectrum of oscillations of the secondary emission current, operational control of penetration.

Лазерная сварка уже несколько десятилетий применяется в высокотехнологичных отраслях промышленности для получения высококачественных сварных соединений деталей из конструкционных сталей и сплавов цветных металлов.

В первые десятилетия в качестве источников мощного лазерного излучения для сварки использовались лазеры на углекислом газе, которые имели большие габариты, низкий (не превышающий 20 %) КПД и не могли конкурировать с таким высококонцентрированным источником энергии, как электронный луч, используемый в установках для электронно-лучевой сварки.

Более широкому внедрению лазерной сварки в промышленное производство способствовало появление мощных оптоволоконных технологических лазеров, которые, по сравнению с лазерами на углекислом газе, обладают более высокой надежностью, относительно малыми габаритами и обеспечивают высокое оптическое качество излучения. Кроме того, длина волны излучения оптоволоконных лазеров на порядок меньше, чем у лазеров на углекислом газе, что обуславливает меньшее потребление энергии, а их непрерывное совершенствование обеспечивает снижение стоимости и увеличение КПД технологических лазерных установок. В качестве недостатков мощных оптоволоконных лазеров следует отметить снижение эксплуатационной надежности резонатора при повышении мощности лазера, а также повышенную чувствительность резонатора к процессам отражения луча, который имеет место при взаимодействии лазерного излучения с обрабатываемым материалом.

В последние годы в качестве мощных технологических лазеров стали применяться дисковые лазеры, принцип работы которых основан на использовании охлаждаемого активного элемента в форме диска. Высокая эффективность охлаждения лазерной среды обеспечивается за счет большой площади поверхности диска, поэтому мощность излучения в пучке дискового лазера может достигать достаточно высоких значений. Важными преимуществами дисковых лазеров являются: возможность регулирования значений мощности излучения без изменения других параметров, отсутствие чувствительности резонатора к попаданию отраженного лазерного излучения, а также

модульная конструкция лазера, которая позволяет заменять отдельные модули при сервисном обслуживании.

Одной из существенных проблем при лазерной сварке с глубоким проплавлением является поглощение части мощности луча плазменным облаком, образующимся над зоной воздействия лазерного луча на металл, и связанное с этим существенное снижение глубины проплавления по сравнению с электронным лучом той же мощности. При этом эффективность лазерной сварки при соединении толстостенных деталей значительно уступает процессу электронно-лучевой сварки, широко применяющейся при изготовлении изделий ответственного назначения, что сдерживает широкое внедрение лазерной сварки в промышленное производство.

Для снижения экранирующего влияния плазменного облака и, соответственно, увеличения глубины проплавления при лазерной сварке используются такие технологические приемы, как нанесение специальных покрытий на металл перед сваркой, отклонение оси лазерного излучения от нормали в сторону, противоположную скорости сварки, на 20° – 30° , колебания лазерного пучка в различных направлениях относительно стыка, применение импульсно-периодического режима работы лазера, сдувание газоплазменного облака различными газами и их смесями [1–5].

Однако указанные технологические приемы не решают проблем, связанных с потерями мощности лазерного луча в плазменном облаке над зоной сварки. В связи с этим в последние годы все более возрастает интерес к лазерной сварке в вакууме, которая, несмотря на некоторые ограничения, связанные с использованием вакуумной камеры, позволяет получить по сравнению с лазерной сваркой в среде защитных газов значительно большую глубину проплавления при той же мощности лазерного луча, а также обеспечивает эффективную защиту зоны сварки от воздействия внешней среды, что является особенно важным при сварке активных металлов [6–8].

Обеспечение при сварке высокой воспроизводимости качества сварных соединений и отсутствия дефектов в сварном шве в большинстве случаев требует осуществления оперативного контроля над процессом формирования шва. При элект-

ронно-лучевой сварке широкое применение нашли вторично-эмиссионные способы контроля над процессом взаимодействия электронного луча с металлом, при которых регистрируются параметры вторично-эмиссионных сигналов из зоны взаимодействия электронного луча с металлом [9–11].

В зоне лазерной сварки в вакууме протекают процессы, аналогичные процессам при электронно-лучевой сварке мощным электронным лучом: интенсивная термоэлектронная эмиссия из конденсированной фазы металла, образование плазменного облака над зоной сварки и наличие широкого спектра колебательных процессов в канале проплавления, образованном мощным концентрированным лучом лазера [12–14].

Цели данной работы – численное моделирование вторично-эмиссионных процессов в плазме в зоне воздействия мощного концентрированного лазерного луча на металл в вакууме и экспериментальное исследование параметров вторично-эмиссионных процессов в зоне лазерной сварки в вакууме с целью использования этих сигналов для контроля и управления процессом формирования сварного шва.

Для численного моделирования процессов формирования электронного и ионного тока в плазме при лазерной сварке в вакууме была разработана модель [15], в основе которой лежат уравнения переноса для концентрации электронов и средней энергии электронов в плазме над зоной сварки:

$$\frac{\partial(n_e)}{\partial t} + \nabla \bar{\Gamma}_e = R_e;$$

$$\frac{\partial(n_e)}{\partial t} + \nabla \left[-n_e (\mu_e \bar{E}) - D_e \nabla n_e \right] + e \bar{E} \bar{\Gamma}_e = R_e,$$

где μ_e – подвижность электронов; R_e – интенсивность источника электронов; n_e – объемная плотность энергии электронов; R_e – источник энергии электронов (описывает потери энергии в результате неупругих соударений); \bar{E} – вектор напряженности электрического поля; $\bar{\Gamma}_e$ – плотность потока электронов.

Для описания массопереноса тяжелых частиц плазмы (ионов, нейтральных невозбужденных и возбужденных атомов) в модели использовано уравнение переноса массы для многокомпонентной смеси:

$$\rho \cdot \frac{\partial(\omega_k)}{\partial t} + \rho(\bar{u} \nabla) \omega_k = \nabla \bar{j}_k + R_k,$$

где \bar{j}_k – плотность потока массы k -й компоненты; ω_k – массовая доля k -й компоненты; R_k – интенсивность источника k -й компоненты; \bar{u} – средний вектор скорости среды; ρ – плотность смеси.

Электрическое поле определялось из уравнения Пуассона.

Для получения численного решения использовался пакет прикладного программного обеспечения COMSOL 4.4, модули Plasma Module. Задача решалась в осесимметричной постановке в цилиндрической системе координат.

Геометрия расчетной области представлена на рис. 1. Кольцевой коллектор электронов плазмы расположен над зоной сварки. Образование плазмы рассматривалось как результат ионизации истекающих из канала проплавления паров металла лазерным лучом.

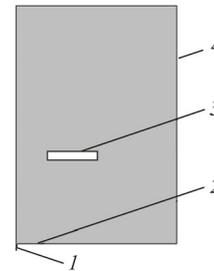


Рис. 1. Геометрия вычислительной области: 1 – канал проплавления; 2 – поверхность металла, нагреваемого лазерным лучом; 3 – коллектор заряженных частиц; 4 – границы вычислительной области

Коэффициент диффузии для электронов D_e , коэффициенты подвижности μ_e и диффузии D_e для энергии вычисляются в предположении Максвелловского распределения по энергиям через подвижность электронов по выражению

$$D_e = \mu_e T_e, \quad \mu_e = \frac{5}{3} \mu_e, \quad D_e = \mu_e T_e.$$

Плотность смеси задается уравнением состояния идеального газа $\rho = p M_n / R_u T$, где R_u – универсальная газовая постоянная. В общем случае вычисление давления газовой смеси требует решения системы уравнений Навье – Стокса с учетом конвективного теплопереноса. При этом для областей в канале проплавления, образованным в металле лазерным лучом, и над зоной воздействия лазерного луча режим сплошного течения сменяется промежуточным режимом (число Кнудсена $0,01 < Kn < 10$). В промежуточном режиме уравнения Навье – Стокса тоже применимы, но при этом используются специальные модифицированные граничные условия. Поскольку моделирование на-

правлено в первую очередь на понимание физических процессов, протекающих при регистрации сигналов вторично-эмиссионных токов в плазме, при лазерной сварке в вакууме достаточным приближением будет использование линейной аппроксимации известных из литературы данных по взаимодействию концентрированных потоков энергии с веществом [5, 13, 14].

Значения давления и температуры на дне канала проплавления приняты 7 кПа и 2700 К соответственно, в верхней части – 3 кПа и 2200 К. Над зоной воздействия лазерного луча на металл течение паров металла постепенно переходит в свободномолекулярное. В этом случае в связи с постоянством скорости плотность паров может быть оценена из условия неизменности потока массы $\rho R^2 = \rho_0 R_0^2 = \text{const}$, где R – дистанция до поверхности металла в районе канала проплавления, ρ_0 и R_0 – плотность и радиус канала проплавления в верхней части.

Важной особенностью модели является то, что она позволяет рассчитать параметры плазмы не только над зоной сварки, но и непосредственно в формирующемся парогазовом канале.

Кроме того, описанная модель позволяет рассчитать изменение параметров при возбуждении самостоятельного разряда в плазме над зоной воздействия лазерного луча на металл в вакууме путем подачи на коллектор заряженных частиц положительного потенциала. В первую очередь изменения заметны в распределении потенциала. Потенциал практически во всей области становится близок установившемуся напряжению на коллекторе. Вблизи катода (металлического образца, на который воздействует лазерный луч) возникает слой, на котором происходит изменение этого потенциала до 0 (рис. 2).

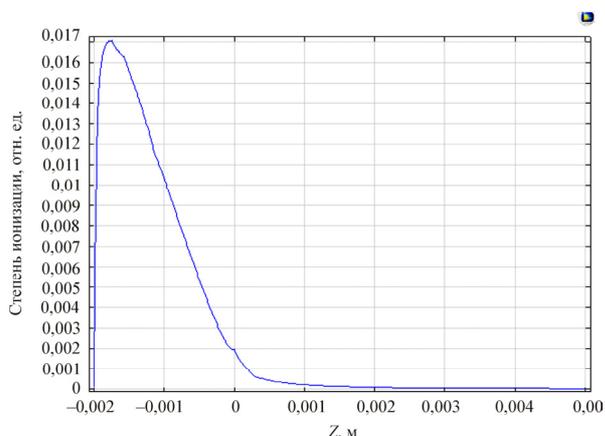


Рис. 2. Степень ионизации плазмы при лазерной сварке вдоль оси Z в канале проплавления и над сварочной ванной

В канале проплавления этот слой становится особенно тонким, что приводит к возникновению у поверхности сильного электрического поля. Расчеты показывают, что по всей длине стенки канала проплавления напряженность электрического поля составляет величину порядка 10^5 – 10^6 В/м. Столь сильное электрическое поле существенно снижает высоту потенциального барьера и работу выхода электронов.

Плотность эмиссионного тока в этом случае описывается выражением Ричардсона – Шоттки. Получена зависимость вторично-эмиссионного тока в плазме от геометрических параметров канала проплавления, образованного лазерным лучом. Величина этого тока падает с увеличением глубины проплавления по закону, близкому к экспоненциальному (рис. 3).

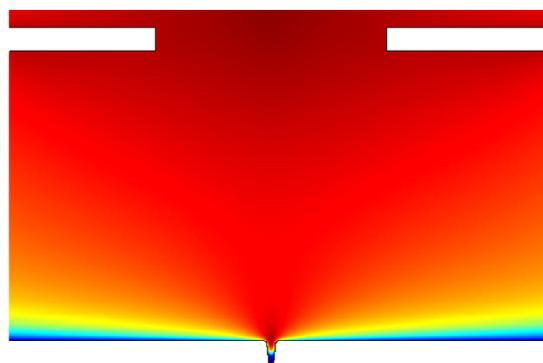


Рис. 3. Распределение потенциала в плазме над зоной сварки и в канале проплавления при возбуждении самостоятельного разряда

Данная зависимость обуславливает экстремальный характер изменения величины вторично-эмиссионного сигнала в зависимости от фокусировки лазерного луча и других технологических параметров лазерной сварки в вакууме, что может быть использовано при построении методов оперативного контроля процесса сварки. При изменении внешнего давления величина сигнала монотонно уменьшается по закону, близкому к обратному, что удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

Экспериментальные исследования вторично-эмиссионных сигналов в зоне лазерной сварки в вакууме проводились на установке для лазерной сварки ALFA-300, оснащенной технологической камерой, которая откачивалась вакуумным пластинчато-роторным насосом ERSTEVAK PRM 54. Измерение вакуума производили с использованием вакуумного датчика МТМ-9D фирмы Erstvak. При проведении экспериментальных исследований напряжение накопителя твердотельного импульсного Nd-YAG-лазера сварочной установки регулирова-

лось в пределах 200–400 В. В качестве материала образцов использовалась аустенитная сталь 12Х18Н10Т.

Схема регистрации вторично-эмиссионных сигналов в зоне лазерной сварки в вакууме приведена на рис. 4. Над зоной воздействия лазерного луча на металл устанавливался коллектор заряженных частиц, включенный во внешнюю электрическую цепь для зарядов плазмы, содержащую источник напряжения смещения и резистор нагрузки [16, 17]. Величина напряжения смещения составляла 60 В. Сигнал с резистора нагрузки подавался на вход аналого-цифрового преобразователя Е14-440 фирмы L-Card, подключенного к компьютерной информационно-измерительной системе. Результаты измерения записывались в файл и обрабатывались в среде MathCad.

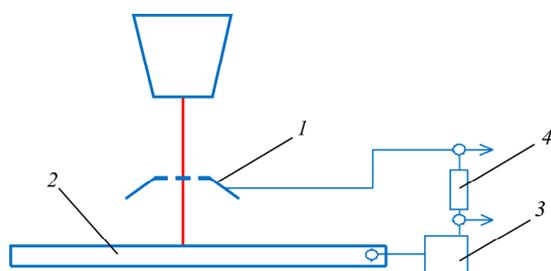


Рис. 4. Схема регистрации вторично-эмиссионного тока при лазерной сварке: 1 – коллектор заряженных частиц; 2 – свариваемое изделие; 3 – источник напряжения смещения; 4 – резистор нагрузки

Предварительный анализ спектра колебаний, регистрируемого коллектором заряженных частиц при воздействии лазерного луча на металл в вакууме, показал, что в спектре колебаний вторично-эмиссионного тока наблюдаются составляющие с частотой порядка 10^4 Гц, связанные как с автоколебаниями, вызываемыми локальными перегревами металла в зоне воздействия лазерного луча, так и с ионно-звуковой и потенциально-релаксационной неустойчивостями в плазме. Эти высокочастотные компоненты спектра колебаний тока в плазме в зоне лазерной сварки в вакууме дополнительно модулируются колебаниями с более низкой частотой, вызванными капиллярными неустойчивостями канала проплавления, стохастическим перемещением зоны взаимодействия лазерного луча с металлом на передней стенке канала, пульсациями потоков пара из канала и другими периодическими процессами в канале проплавления.

В соответствии с этим ставилась задача дифференцировать составляющие спектра колебаний вторично-эмиссионного сигнала из зоны воздействия лазерного луча, связанные с различного вида неустойчивостями в плазме, и составляющие спек-

тра, обусловленные автоколебательными процессами в канале проплавления, так как последние должны в большей степени коррелировать с технологическими параметрами лазерной сварки в вакууме и геометрическими параметрами зоны проплавления в металле при воздействии лазерного луча в вакууме.

Ввиду того, что характер автоколебательных процессов в плазменном облаке над зоной лазерной сварки в вакууме, связанный с различного рода неустойчивостями в плазме, в значительной степени определяется геометрией плазмы, были проведены исследования влияния расстояния между коллектором заряженных частиц, осуществляющим отбор вторично-эмиссионного тока из плазмы, и поверхностью металла, подвергаемого воздействию лазерного луча в вакууме, на амплитудно-временные параметры вторично-эмиссионного сигнала.

На рис. 5 представлена зависимость частоты компоненты спектра колебаний вторично-эмиссионного тока при лазерной сварке в вакууме, обусловленной ионно-звуковыми колебаниями в плазме, от расстояния между коллектором заряженных частиц, регистрируемого коллектором заряженных частиц при воздействии лазерного луча на металл в вакууме при изменении расстояния между коллектором и поверхностью металла [18].

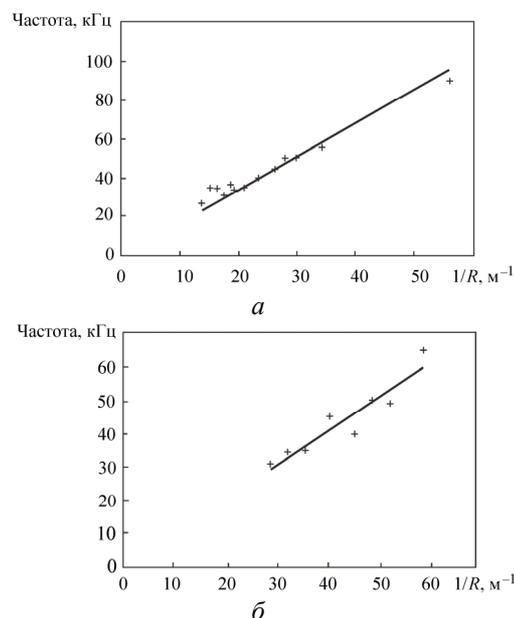


Рис. 5. Зависимость частоты компоненты спектра колебаний вторично-эмиссионного тока при лазерной сварке в вакууме от расстояния между коллектором заряженных частиц: а – вертикальное перемещение; б – горизонтальное перемещение

Как видно из рис. 5, при уменьшении расстояния от поверхности металла до коллектора заряженных частиц частота регистрируемых высоко-

частотных компонент спектра увеличивается, а анализ спектра колебаний этих компонент показал, что спектральная плотность компонент, связанных с ионно-звуковой и релаксационной неустойчивостями в плазме, уменьшается. Это свидетельствует о том, что при регистрации вторично-эмиссионного тока с целью контроля геометрических параметров проплавления при лазерной сварке в вакууме необходимо размещать электрод – коллектор заряженных частиц в непосредственной близости от поверхности свариваемого металла.

Следующим этапом исследований вторично-эмиссионных процессов при лазерной сварке в вакууме было изучение влияния степени вакуумирования технологической камеры установки на амплитудно-временные параметры вторично-эмиссионного тока. На рис. 6 приведены осциллограммы вторично-эмиссионного тока, регистрируемого коллектором заряженных частиц, при различном давлении в технологической вакуумной камере.

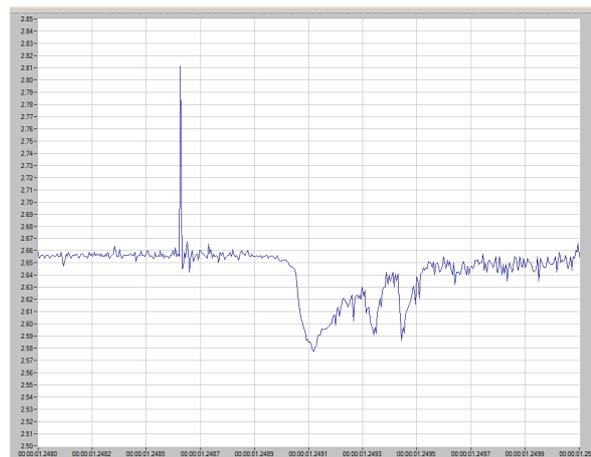
Результаты экспериментов показали, что при повышении давления в технологической вакуумной камере лазерной установки амплитуда импульсов вторично-эмиссионного тока в плазме уменьшается и становится равной 0 при давлении в камере, близком к атмосферному.

Применительно к колебательным процессам в плазме в зоне лазерной сварки в вакууме, возникающим в результате формирования различного вида неустойчивостей, это связано с тем, что при давлении, близком к атмосферному, вследствие известного в физике плазмы механизма столкновительного затухания колебаний, при высоких значениях концентрации нейтральных частиц, возрастает вероятность соударения частиц плазмы за период колебаний. Число этих столкновений при давлении, близком к атмосферному, достаточно велико, и колебания затухают достаточно быстро.

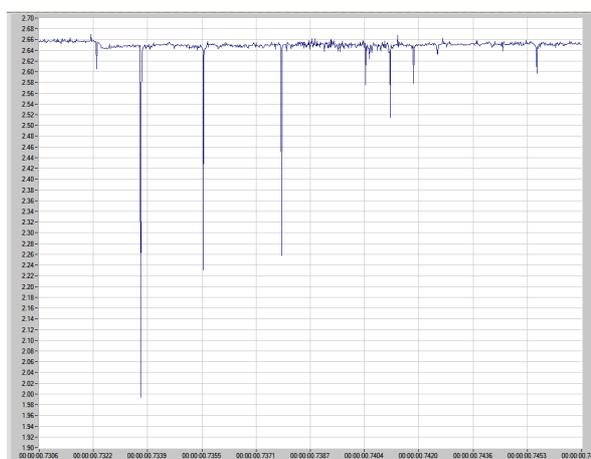
Что касается колебаний вторично-эмиссионного тока, обусловленных периодическими процессами в зоне воздействия лазерного луча на металл в вакууме, то существенное снижение их амплитуды вызвано уменьшением проводимости плазмы в результате уменьшения длины свободного пробега носителей заряда и снижения скорости их дрейфа в плазме.

Были также проведены исследования параметров ионного тока в плазме в зоне лазерной сварки в вакууме, который регистрировался при создании отрицательного потенциала на коллекторе заряженных частиц в схеме, изображенной на рис. 4.

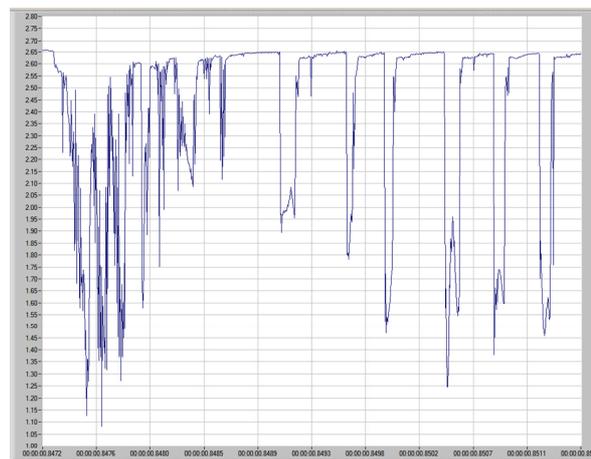
На рис. 7 приведена осциллограмма ионного тока в плазме, образующейся при воздействии лазерного луча на металл в вакууме.



а



б



в

Рис. 6. Осциллограммы вторично-эмиссионного тока в плазме при различной степени вакуумирования технологической камеры установки для лазерной сварки в вакууме. Давление в технологической камере: а – 4000 Па; б – 100 Па; в – 10 Па

Применительно к использованию вторично-эмиссионных сигналов для контроля геометрических параметров проплавления при лазерной свар-

ке в вакууме регистрация ионного тока представляет особый интерес, так как в этом случае регистрируемые параметры сигнала не связаны с возбуждением плазменных автоколебаний и величина ионного тока непосредственно отражает колебания плотности истекающих из канала паров металла [19, 20].

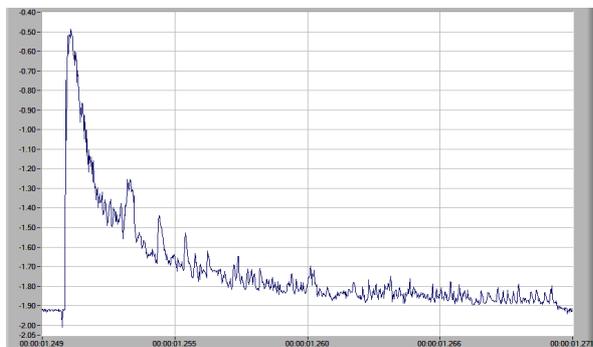


Рис. 7. Оциллограмма ионного тока в плазме, образующейся при воздействии лазерного луча на металл в вакууме

Разработана модель вторично-эмиссионных процессов в плазме при лазерной сварке в вакууме, и выполнено численное моделирование этих процессов. Проведены экспериментальные исследования параметров вторично-эмиссионных процессов при импульсной лазерной сварке в вакууме, результаты которых будут положены в основу разработки методов вторично-эмиссионного контроля процесса формирования шва при лазерной сварке в вакууме.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта № С-26/794 и Российского Фонда Фундаментальных Исследований (Грант № 16-48-590208).

Список литературы

1. Веденов А.А., Гладуш Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 208 с.
2. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
3. Виноградов Б.А., Гавриленко В.Н., Либенсон М.Н. Теоретические основы воздействия лазерного излучения на материалы. – Благовещенск: Изд-во БПИ, 1993. – 344 с.
4. Зуев И.В. Обработка материалов концентрированными потоками энергии. – М.: Изд-во МЭИ, 1997. – 437 с.
5. Миркин Л.И. Физические основы обработки материалов лучами лазера. – М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1975. – 383 с.

6. Летыгин 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.

7. Лазерная сварка в вакууме – перспективная сварочная технология изготовления изделий ответственного назначения / В.Я. Бельский, Д.Н. Трушников, И.Ю. Летыгин [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2014. – Т. 16, вып. 4. – С. 71–81.

8. 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 (2016): ASRTU conf. proc. / Knowledge E Engaging minds. – Dubai: Knowledge E, 2016. – Vol. 2016. – P. 90–94. – URL: <http://knepublishing.com/index.php/KnE-Materials/article/view/568/1818>.

9. Бельский В.Я., Трушников Д.Н. Исследование формирования сигнала вторичного тока в плазме при электронно-лучевой сварке с осциллирующей электронной пучкой // Сварочное производство. – 2012. – № 11. – С. 9–13.

10. Рентгеновская спектроскопия лазерной плазмы / В.А. Бойко [и др.] // Итоги науки и техники. Радиотехника. – 1980. – Т. 27. – 264 с.

11. 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.

12. 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, 19–20 November, 2016 / ed. J. Zhao; Trans Tech. Publications Inc. – 2017. – Vol. 893. – P. 1662–9752.

13. Lieberman M.A., Lichtenberg A.J. Principles of plasma discharges and materials processing // MRS Bulletin. – 1994. – Vol. 30. – P. 899–901.

14. Гуреев Д.М., Ямщиков С.В. Основы физики лазеров и лазерной обработки материалов: учеб. пособие / Самар. ун-т. – Самара, 2001. – 392 с.

15. Trushnikov D.N., Mladenov G.M. Numerical model of the plasma formation at electron beam welding // Journal of Applied Physics. – 2015. – Vol. 117, № 1. – P. 013301.

16. Trushnikov D.N., Belenkiy V.Ya., Portnov N.S. Secondary – emission signal for weld formation monitoring and control in electron beam welding (EBW) // Material wissenschaft und Werkstofftechnik. – 2012. – Vol. 43, № 10. – P. 892–897.

17. 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.

18. Current-driven ion-acoustic and potential-relaxation instabilities excited in plasma plume during electron beam welding / G.M. Mladenov, E.G. Koleva, S.V. Varushkin, D.N. Trushnikov, V.Y. Belenkiy. – 2014. – Vol. 4, iss. 4. – P. 1–10.

19. Янчук Л.М., Зуев И.В., Углов А.А. О влиянии степени заглупления фокуса материала на параметры

проплавления при электронно-лучевой сварке // Сварочное производство. – 1974. – № 12. – С. 3–4.

20. Летыгин И.Ю., Федосеева Е.М. Оценка сквозного проплавления при лазерной сварке на основе регистрации плазменного факела // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т. 18, вып. 1. – С. 84–100.

References

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

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

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

4. Zuev I.V. Obrabotka materialov kontsentriruvannymi potokami energii [Processing of materials the concentrated energy streams]. Moscow: Izdatel'stvo MPEI, 1997, 437 p.

5. 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.

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

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

8. 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 (2016): ASRTU conf. proc. Knowledge E Engaging minds. – Dubai: Knowledge E*, 2016, vol. 2016, pp. 90–94. URL: <http://knepublishing.com/index.php/KnE-aterials/article/view/568/1818>.

9. Belen'kii V.Ia., Trushnikov D.N. Issledovanie formirovaniia signala vtorichnogo toka v plazme pri elektronno-luchevoi svarkе s ostsiillatsiei elektronnogo puchka [A 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.

10. Boiko V.A. Rentgenovskaia spektroskopiya lazernoi plazmy / [X-ray spectroscopy of laser plasma]. *Itogi nauki i tekhniki. Radiotekhnika*, 1980, vol. 27, 264 p.

11. Trushnikov D.N., Belenkiy V.Ya., Salomato-va 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.

12. 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*, 19–20 November, 2016. Ed. J. Zhao; Trans Tech. Publications Inc., 2017, vol. 893, pp. 1662–9752.

13. Lieberman M.A., Lichtenberg A.J. Principles of plasma discharges and materials processing. *MRS Bulletin*, 1994, vol. 30, pp. 899–901.

14. Gureev D.M., Iamshchikov S.V. Osnovy fiziki lazеров i lazernoi obrabotki materialov: uchebnoe posobie [Fundamentals of physics of lasers and laser processing of materials]. *Samarskii universitet*, Samara, 2001, 392 p.

15. Trushnikov D.N., Mladenov G.M. Numerical model of the plasma formation at electron beam welding. *Journal of Applied Physics*, 2015, ol. 117, no. 1, pp. 013301.

16. Trushnikov D.N., Belenkiy V.Ya., Portnov N.S. Secondary – emission signal for weld formation monitoring and control in electron beam welding (EBW). *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2012, vol. 43, no. 10, pp. 892–897.

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

18. Mladenov G.M., Koleva E.G., Varushkin S.V., Trushnikov D.N., Belenkiy V.Y. Current-driven ion-acoustic and potential-relaxation instabilities excited in plasma plume during electron beam welding, 2014, vol. 4, iss. 4, pp. 1–10.

19. Ianchuk L.M., Zuev I.V., Uglov A.A. O vliianii stepeni zaglublennii fokusa materiala na parametry proplavleniia pri elektronno-luchevoi svarkе [About influence of extent of deepening of focus of material on pro-melting parameters at an electron beam svark]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1974, no. 12, pp. 3–4.

20. Letiagin I.Iu., Fedoseeva E.M. Otsenka skvozno- go proplavleniia pri lazernoi svarkе na osnove registratsii plazmennogo fakela [Assessment of through pro-melting at laser welding on the basis of registration of a plasma torch]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2016, vol. 18, iss. 1, pp. 84–100.

Получено 15.08.2018

Об авторах

Летыгин 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.

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.

Бельский 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.

Шеньён Панг (Ухань, Китайская Народная Республика) – кандидат наук, доцент Школы материаловедения и инженерии, директор Государственной лаборатории обработки материалов и технологий литья Хуачжунского университета науки и технологии; e-mail: spang@hust.edu.cn.

Лямин Яков Васильевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: yakov_lyamin@mail.ru.

About the authors

Igor Yu. Letyagin (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Depart-

ment of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: letyagin@pstu.ru.

Dmitrii 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

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; e-mail: vladimirbelenkij@yandex.ru.

Shengyong Pang (Wuhan, China) – Ph.D. in Material Processing Engineering, Associate Professor, State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Director, Computational Welding Process Design Laboratory at Huazhong University of Science and Technology; e-mail: spang@hust.edu.cn.

Yakov V. Lyamin (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: yakov_lyamin@mail.ru.