

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.1.06

УДК 621.791.75

И.Ю. Летягин, Е.М. ФедосееваПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**ОЦЕНКА СКВОЗНОГО ПРОПЛАВЛЕНИЯ
ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ НА ОСНОВЕ
РЕГИСТРАЦИИ ПЛАЗМЕННОГО ФАКЕЛА**

Широкое применение лазерной сварки при изготовлении продукции ответственного и особо ответственного назначения обуславливается как снижением стоимости лазерного оборудования, так и повышением стабильности технологий лазерной сварки. Большое значение в технологии сварки, помимо контроля и управления параметрами процесса, приобретают контроль и управление процессом проплавления металла свариваемого изделия. Большинство изделий, в которых перспективно использование лазерной сварки, имеют малые толщины. В связи с опасностью возникновения таких дефектов, как непровары и прожоги, возникает необходимость оперативного контроля процесса сквозного проплавления при лазерной сварке.

Процессы при лазерной сварке в значительной степени схожи с процессами, наблюдаемыми при электронно-лучевой сварке. В частности, процессы испарения материала, образования и развития парогазового канала, взаимодействия излучения с парами и плазмой позволяют использовать результаты исследований электронно-лучевой сварки в применении к процессам контроля проплавления при лазерной сварке. При этом большое значение имеют теоретические и практические исследования, описывающие механизм образования плазменного факела. Большое количество исследований посвящено изучению процесса взаимодействия лазерного излучения с ионизированными парами материала. Проводимые исследования в основном направлены на изучение физической природы явления и установление ряда закономерностей зарождения и развития плазмы при лазерном облучении поверхностей. Однако практически не исследованы прикладные вопросы, касающиеся характера влияния плазменного факела в различных газовых атмосферах, используемых при лазерной обработке, на глубину проплавления и энергетическую эффективность той или иной лазерной технологии.

Плазменный факел, являясь источником заряженных частиц при всех видах лазерной обработки, обеспечивает прохождение значительного по величине тока. Изучение характеристик «лазерной плазмы», позволило создать регистрационную систему. Для отбора тока из плазмы, образующегося в зоне действия лазерного луча, использован коллектор заряженных частиц. Запись сигнала тока в плазме производится с помощью персонального компьютера, оснащенного аналого-цифровым преобразователем. Данный сигнал является информативным и позволяет производить оперативный контроль над процессом сквозного проплавления свариваемых толщин за счет оценки выброса плазмы из корня сварного шва.

Ключевые слова: лазерная сварка, сварка малых толщин, сквозное проплавление, плазма, пробой газа, плазменный факел, ионизация паров металла, информационно-измерительная система, аналого-цифровой преобразователь, коллектор заряженных частиц.

I.Iu. Letiagin, E.M. Fedoseeva

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ASSESSMENT OF THROUGH PRO-MELTING AT LASER WELDING ON THE BASIS OF REGISTRATION OF A PLASMA TORCH

The considerable volume of application of laser welding at production of production of responsible and especially responsible appointment is caused both depreciation of the laser equipment, and increase of stability of technologies of laser welding. The great value in technology of welding besides control and management of parameters of process is got by control and management of process of pro-melting of metal of the welded product. The majority of products in which use of laser welding is perspective have small thickness. Due to the danger of emergence of such defects as either burn through and sites of incomplete pro-melting there is a need of an operating control of process of through pro-melting at laser welding.

Processes at laser welding it is substantially similar to the processes observed at electron beam welding. In particular material evaporation processes, education and development of the steam-gas channel, interaction of radiation with vapors and plasma allow to use results of researches of electron beam welding in application to processes of control of pro-melting at laser welding. Thus the theoretical and practical researches describing the mechanism of formation of a plasma torch are of great importance. A large number of researches is devoted to studying of process of interaction of laser radiation with the ionized material vapors. The conducted researches are generally directed on studying of the physical nature of the phenomenon and establishment of a number of regularities of origin and development of plasma at laser radiation of surfaces. However applied questions of nature of influence of a plasma torch in various gas atmospheres used at laser processing on depth of pro-melting and power efficiency of this or that laser technology are almost not investigated.

Plasma torch, being a source of charged particles at all types of laser processing, provides passing of current, considerable in size. Studying of characteristics of laser plasma, allowed to create registration system. For selection of current from plasma, formed in an area of coverage of a laser beam, the collector of charged particles is used. Record of a signal of current in plasma is made by means of the personal computer equipped with the analog-digital converter. This signal is informative and allows to make an operating control process of through pro-melting of the welded thickness at the expense of an assessment of emission of plasma from a root of a welded seam.

Keywords: laser welding, welding of small thickness, through pro-melting, plasma, gas breakdown, plasma torch, ionization of vapors of metal, information and measuring system, analog-digital converter, collector of charged particles.

В последние годы в промышленности при изготовлении деталей широко применяется лазерная сварка – процесс получения неразъемного соединения путем сплавления примыкающих друг к другу поверхностей свариваемых деталей с помощью энергии лазерного излучения. По классификации лазерная сварка относится к методам сварки плавлением, а по величине плотности энергии в зоне сварки – к высококонцентрированным источникам энергии.

Областей применения лазерной сварки много. К ним можно отнести машиностроение, включающее оборонную и космическую про-

мышленность, а также приборостроение и электронику, энергетику и электротехнику, транспорт, медицинскую и пищевую промышленность и др. Примерами изделий ответственного и особо ответственного назначения для лазерной сварки можно считать сильфоны из тонкостенных нержавеющей сталей, малые герметичные сосуды, используемые в авиационной и ракетно-космической отраслях, платы контрольных микросхем. В таких изделиях от бездефектности сварки во многом зависит не только эффективность работы предприятия, но и интересы государства, экология, жизнь и здоровье потребителей. Всё это существенно повышает требования к соблюдению не только качества, производительности, надежности оборудования, но и стабильности технологии лазерной сварки.

Образование сварного соединения сопровождается целым рядом физических явлений, оказывающих влияние как на механизм проплавления, так и на качество сварного шва в целом. Изучение этих явлений позволяет управлять процессом сварки, обоснованно выбирать режимы и прогнозировать получаемые свойства. Так, при сварке малых толщин ($\delta \leq 1$ мм), выполняемой преимущественно в импульсном режиме, целесообразно изучение физических особенностей воздействия лазерных импульсов на металлические материалы, приводящие к формированию сварных точек. При этом исследуемый процесс условно может быть разделен на несколько этапов: поглощение лазерного излучения и передача энергии тепловым колебаниям решетки твердого тела, нагрев металла без разрушения, плавление металла, разрушение металла путем испарения и выброса расплава, остывание после окончания воздействия [1].

Как известно, дуговая сварка листовой стали малой толщины (0,5–2,0 мм) связана с определенными трудностями. Тонкий металл легко прожигают дугой, а прожоги трудно поддаются заправке. Опасаясь этого, сварщик иногда недостаточно проплавляет кромки листов, накладывая валик на нерасплавленные кромки. В этом случае возникают непровары и неплотности. Преимуществом лазерного источника нагрева при сварке металлов малых толщин является то, что при сквозном проплавлении исключается провисание шва и, как следствие, прожоги и подрезы за счет отсутствия механического воздействия на расплавленную ванну. В первую очередь это связано с практическим отсутствием давления на поверхность потока фотонов лазерного луча,

тогда как, например, электродная дуга обладает существенным давлением, на несколько порядков превышающим лазерное.

Сварка материалов толщиной более 1,0 мм лучом лазера принципиально отличается по физическим процессам и механизму проплавления от сварки малых толщин. Так, отличительной особенностью сварки мощным лазерным излучением является образование так называемого «кинжального» проплавления, характеризующегося значительной глубиной при малой ширине шва [2].

Данное явление в значительной степени схоже с явлениями, наблюдаемыми при электронно-лучевой сварке. Лазерное излучение с определенной критической плотностью, попадая на поверхность материала, нагревает его со скоростью, существенно превышающей скорость отвода теплоты за счет теплопроводности, конвекции обратного излучения. Начинается локальное испарение, на поверхности формируется лунка, которая при достаточной мощности источника развивается вглубь материала и приводит к образованию канала, заполненного парами материала. Давление паров материала не дает полости закрыться под действием гидростатических сил окружающего жидкого металла и сил поверхностного натяжения. При соответствующей скорости относительного перемещения луча и обрабатываемого участка канал приобретает динамическую устойчивость и распространяется вглубь материала. На передней стенке канала происходит плавление материала, а затем затвердевание. Наличие канала дает возможность лазерному излучению проникать в материал на некоторую глубину. При этом образуется узкий шов с большим отношением глубины к ширине [3].

Рассмотрение физических процессов, сопровождающих формирование сварного соединения, должно учитывать энергетические условия процесса, кинетику формирования канала, гидродинамические процессы в сварочной ванне, а также взаимодействие излучения с парами и плазмой.

Как известно, в момент образования канала над поверхностью металла возникает светящийся факел, состоящий из частиц испарившегося металла и снижающий интенсивность лазерного излучения, сфокусированного на свариваемом изделии, что объясняется фотоэлектрическим поглощением. Поглощение обуславливается возбужденными атомами, процессами тормозного поглощения электронами в поле ионов и нейтральных атомов, на частицах конденсата и в каплях жидкой

фазы, а также плазмой, возникающей в результате оптического пробоя в газовой среде. Таким образом, факел, или облако плазмы, рассеивают часть лазерного излучения при прохождении через него к свариваемому изделию, что снижает величину проплавления.

Использование больших величин плотности мощности лазерного излучения в процессе обработки материалов приводит к возникновению низкотемпературной плазмы. Плазма возникает как в воздушной среде, так и в защитном газе. Существует предположение, что в процессе обработки мощным лазерным излучением наблюдается низкая эффективность использования энергии, что в значительной степени обусловлено плазменными процессами поглощения и рассеяния излучения. Следствием этого можно считать снижение мощности и степени сосредоточенности теплового пятна излучения на поверхности материала [4]. Таким образом, важным является изучение состояния вопроса по данной теме, охватывающего результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса лазерной сварки, и расширение знаний о процессе образования и существовании лазерной плазмы.

В литературных источниках представлены различные теоретические и практические основы описания механизма образования плазменного факела. Фундаментальные исследования процесса возникновения оптического пробоя в газах под воздействием лазерного излучения были выполнены в работе [5], где установлены условия осуществления лазерной искры (пробоя) и последующего распространения этого разряда. При этом в исследовании [2] разработана теоретическая концепция возникновения плазмы. В основе ее – рассмотрение процесса испарения материала лазерным лучом с дальнейшим поглощением лазерного излучения в парах материала, при котором наблюдается одновременный рост степени ионизации и температуры.

Известен также подход, в основе которого лежит процесс возникновения плазмы при ионизации в объемах газа, примыкающих к обрабатываемой поверхности. Выявлено, что порог ионизации уменьшается в результате эмиссии электронов с поверхностного участка, подвергнутого лазерному облучению. Как следствие, повышается температура газа, вызванного ударной волной от испарившегося вещества и сопутствующего подогрева газа, контактирующего с нагретой поверхностью.

Значительное влияние на образование плазмы могут также оказывать слои окислов, микронеоднородности и дефекты структуры по-

верхностных слоев обрабатываемого изделия, а также возможность возникновения между парами металла и окружающим газом реакций химического взаимодействия.

Следует отметить, что пары металла над обрабатываемой поверхностью присутствуют почти при всех видах лазерной обработки, при которых происходит нагрев металла до плавления и последующего испарения, поэтому на начальной стадии образования плазменного факела следует рассматривать ионизацию при учете концентрации частиц металлического пара, которые обладают низким потенциалом ионизации. Механизм возникновения и развития электронной лавины в легкоионизируемой примеси описан в работе [6]. Ионизация вызывается быстрыми электронами, приобретающими энергию от фотонов лазерного излучения. Электроны, обладающие достаточной энергией, в процессе столкновения с атомом вызывают ионизацию. В результате выделяются два свободных электрона, обладающие небольшой энергией. Далее процесс поглощения фотонов электронами материала и последующая ионизация при столкновениях с атомами повторяются. Описанный процесс приводит к лавинной ионизации, т.е. к возникновению плазменного факела.

На первой стадии возникновения плазменного факела свободные электроны рассеиваются. При столкновениях с нейтральными атомами пара и газа они отбирают энергию. Плазменный факел на стадии окончательного формирования уже характеризуется сильной ионизацией. Вследствие малости поглощения излучения оптического и инфракрасного диапазонов для заметной диссипации его энергии в области ограниченных размеров требуются очень высокие степени ионизации, т.е. высокие температуры. Только при таких температурах в плазме будет присутствовать количество энергии, достаточное для ее поддержания. В этих условиях поглощение энергии лазерного излучения будет осуществляться при столкновениях электронов с положительными ионами, а не с нейтральными атомами, как это было в начальный период ионизации. При степени ионизации, превышающей несколько процентов, рассеяние электронов на ионах намного превышает рассеяние на атомах [7].

Существует и несколько иная точка зрения на причины возникновения плазменного факела около поверхности металла при лазерном облучении. В некоторых работах [8] было теоретически обосновано, что

физическую природу образования пробоя можно сравнить с поджигом – возникновением химических реакций горения от горячей поверхности. Пробой происходит благодаря термической ионизации паров металла. При этом считается, что испарение материала будет незначительным. Граничное значение плотности мощности, обеспечивающее пробой, в основном зависит от таких свойств материала обрабатываемой поверхности, как теплопроводность, коэффициент поглощения, энергия испарения, потенциал ионизации атомов пара. Согласно этой теории свойства окружающего газа и его давление незначительно влияют на величину граничной плотности мощности.

Вместе с тем был изучен механизм пробоя газа в результате значительного повышения напряженности электрического поля при лазерном излучении, возникающий вблизи металлической поверхности у вершин микронеровностей поверхности. При этом малые участки микровыступов нагреваются до температуры кипения за чрезвычайно короткий промежуток времени, что на несколько порядков быстрее, чем макроучастки в пятне нагрева лазерным лучом. На этих микровыступах поверхности возникают области полностью ионизированной плазмы, которые при высоких плотностях мощности являются источниками светодетонационных волн. Эти волны распространяются за доли микросекунд на весь облучаемый лазером участок поверхности [9].

В ряде работ рассмотрено возникновение лазерной искры и образование волны горения газа, т.е. распространение оптического разряда. Проводились детальные исследования развития искры фотографическим методом с временной разверткой, методом высокоскоростной покадровой съемки, голографическим и другими методами специальной фотографии. Исследованиями установлено, что эта волна распространяется в направлении от поверхности навстречу излучению до тех пор, пока плотность потока излучения остается достаточно высокой. Образование волны объясняется достижением плотностью мощности ее порогового значения. При этом эффект возникновения волны сопровождается яркой вспышкой света и резким возрастанием шума.

При движении волны навстречу излучению происходит изменение параметров плазмы. Одной из важных характеристик, определяющих параметры и различные особенности поведения оптического разряда, является его скорость распространения. На основе описания скоростных параметров оптического разряда рассмотрен процесс стабилизации оп-

тического разряда в сфокусированном лазерном излучении с использованием продольного потока газа, направляемого соосно направлению лазерного излучения. Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные авторами, установили, что при распространении оптического разряда навстречу излучению происходит падение скорости распространения фронта разряда с одновременным уменьшением максимальной температуры в плазме.

Наилучшим образом стабилизация оптического разряда осуществляется в сфокусированном лазерном излучении с помощью потока газа, направленного по лучу. При заданной мощности лазерного излучения фронт разряда будет располагаться на различных расстояниях от фокуса в зависимости от скорости потока газа, а именно в таком сечении луча, где плотность мощности излучения гарантирует скорость распространения фронта разряда, равную скорости набегающего потока газа.

Мощность лазерного излучения, достаточная для поддержания оптического разряда, зависит от давления газа. С повышением давления газа увеличивается коэффициент поглощения и, следовательно, увеличивается тепловыделение, определяемое произведением плотности мощности лазерного излучения на коэффициент поглощения. Поэтому для компенсации потерь теплопроводности при более высоких давлениях газа могут быть использованы меньшие плотности мощности.

Возникновение лазерной плазмы приводит к существенному изменению оптических свойств среды, в которой распространяется лазерное излучение. Обычно исследователи связывают это изменение оптических свойств с изменением фокусировки светового пучка. В определенных условиях эти явления могут приводить к уменьшению расходимости, а именно к самофокусировке света. Обычно эффект самофокусировки сравнивается с эффектом появления диэлектрического волновода, возникающего при нелинейном изменении диэлектрической проницаемости.

Распределение плотности мощности в поперечном сечении излучения оказывает сильное влияние на процесс самофокусировки. Уменьшение плотности мощности вблизи оси луча может приводить к фокусировке основной части луча в среде, где лазерное излучение расфокусируется [10].

В работе [11] экспериментально наблюдалась самофокусировка лазерного излучения в сильно поглощающем плазменном факеле. Са-

мофокусировка наблюдалась в области холодных паров, т.е. фокусировка осуществлялась после прохождения излучения через плазму. Механизм самофокусировки основан на изменении диэлектрической проницаемости плазмы. Лазерное излучение создает в поперечном сечении плазмы распределение диэлектрической проницаемости с максимумом на оси луча. Поскольку в неоднородной среде световой луч всегда отклоняется в сторону увеличения диэлектрической проницаемости, лазерное излучение будет при этом фокусироваться.

Таким образом, состояние изучения вопроса возникновения и развития лазерной плазмы показывает, что проведенные теоретические и экспериментальные исследования направлены в основном на раскрытие физической природы явления и установление ряда закономерностей зарождения и развития плазмы при лазерном облучении поверхностей в газовых средах. Однако практически не исследованы прикладные вопросы о характере влияния плазменного факела в различных газовых атмосферах, используемых при лазерной обработке, на глубину проплавления и энергетическую эффективность той или иной лазерной технологии. Большой интерес представляет уточнение механизма взаимодействия паров материала, газовой атмосферы и лазерной плазмы в условиях развитого испарения, характерного для процессов лазерной сварки, резки, наплавки и термообработки с оплавлением поверхностей. Проведение исследований в данной области позволит осуществить разработку способов и устройств для повышения эффективности лазерной обработки [12, 13].

Ближайшим конкурентом лазерной сварки по многим показателям получения качественных сварных швов является электронно-лучевая сварка. В данных способах сварки очень много общего. Так, например, образование плазменных потоков в процессе сварки. Именно это явление было взято за основу метода, разрабатываемого на кафедре «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета. Также для обработки данных была заимствована модель регистрации вторичных электронов, применяемая в процессе электронно-лучевой сварки [14].

Как известно, плазма – частично или полностью ионизированный газ, образованный из нейтральных атомов и заряженных частиц. В большинстве трудов, посвященных образованию плазменных потоков при

лазерной сварке, описывается образование плазмы над сварочной ванной [2, 5, 6]. В ходе серии экспериментов по разработке метода оперативного контроля было установлено, что при лазерной сварке со сквозным проплавлением металла выброс плазмы также происходит из «замочной скважины» сварного шва [15, 16]. Такой выброс плазмы происходит только при сквозном проплавлении металла. В случае если плазма будет положительно или отрицательно заряженной, существует возможность зарегистрировать выброс плазмы из корня сварного шва и, как следствие, зарегистрировать сквозное проплавление металла.

Плазменный факел, возникающий при всех видах лазерной обработки, является источником заряженных частиц и обеспечивает прохождение значительного по величине тока. Изучение характеристик плазмы и, в частности, колебаний ее тока при создании внешней цепи для зарядов плазмы требует высокоскоростной регистрирующей аппаратуры, позволяющей провести анализ спектра колебаний тока и обработку результатов измерений.

Современный уровень компьютерной техники позволяет создать универсальный измерительный комплекс на базе персонального компьютера, дополнив его платой аналого-цифрового преобразования с соответствующим программным обеспечением [17, 18].

В ходе работ, проводимых на кафедре, для осуществления ввода аналоговых сигналов была спроектирована и изготовлена регистрационная система на основе специализированного аналого-цифрового преобразователя, обеспечивающая регистрацию входного сигнала в оперативном запоминающем устройстве компьютера. Задним фронтом сигнала выбора шинного формирователя производится запуск нового цикла преобразования. Формирование временного интервала между замера осуществляется программными средствами. Питание аналого-цифрового преобразователя осуществляется от источника питания компьютера.

Программное обеспечение для записи сигнала, преобразованного аналого-цифровым преобразователем, позволяет обеспечить заданную длительность регистрации сигнала посредством выделения объема памяти компьютера и задания временной выдержки между измерениями.

Формирование сигнала для анализа тока плазмы при импульсной лазерной сварке со сквозным проплавлением металла осуществлялось с использованием коллектора заряженных частиц, устанавливаемого под свариваемым изделием.

В процессе исследований осуществлялись проходы лазерным лучом по пластинам из стали 12Х18Н10Т толщиной 1,2 мм со сквозным проплавлением металла на лазерной сварочной установке модели ALFA-300Т. Под исследуемым образцом на расстоянии 2 мм устанавливался изолированный коллектор заряженных частиц, на который через резистор подавался отрицательный потенциал (рис. 1). При этом коллектор обеспечивал регистрацию плазменных потоков, возникающих под обрабатываемым изделием при сквозном проплавлении в результате интенсивного термического воздействия лазерного луча на металл.

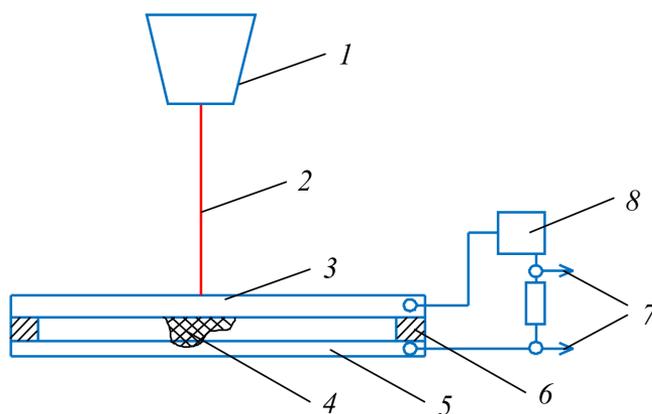


Рис. 1. Схема исследования: 1 – лазерная головка; 2 – лазерный луч; 3 – свариваемое изделие; 4 – плазменный поток; 5 – коллектор; 6 – изолятор; 7 – подключение АЦП; 8 – источник питания

Ток коллектора заряженных частиц фиксировался информационно-измерительной системой, содержащей персональный компьютер с высокоточным аналого-цифровым интерфейсом на базе внешнего модуля АЦП Е14-140М фирмы L-CARD, подключенного к компьютеру по шине USB. Информационно-измерительная система обеспечивала регистрацию тока с коллектора и сохранение результатов в файл для анализа и дальнейшей обработки.

На рис. 2, 3 приведены осциллограммы сигнала с коллектора, регистрируемые компьютерной информационно-измерительной системой и отображаемые в режиме реального времени в программе LGraph.

Из рис. 2 и 3 видно, что коллектор заряженных частиц, установленный под свариваемым изделием и имеющий отрицательный потенциал,



Рис. 2. Осциллограмма тока коллектора заряженных частиц, установленного под свариваемым изделием, при сварке с неполным проплавлением

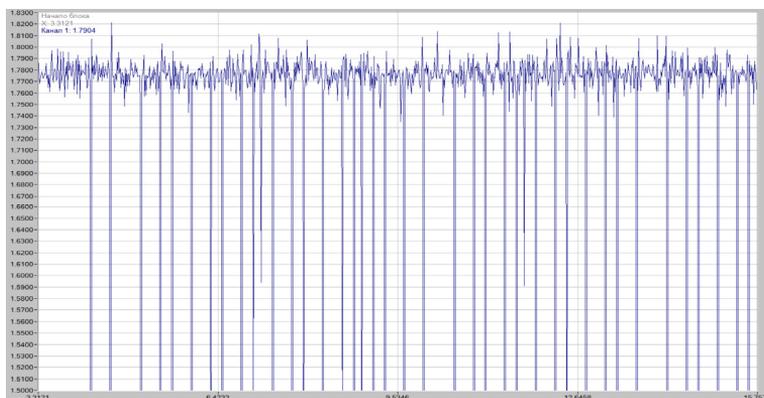


Рис. 3. Осциллограмма тока коллектора заряженных частиц, установленного под свариваемым изделием, при сварке со сквозным проплавлением

позволяет фиксировать выброс плазмы из корня сварного шва. Наличие участков резкого падения тока коллектора свидетельствует о моменте сквозного проплавления.

Опыт исследования процессов образования плазмы при лазерной обработке материалов показывает возможность разработки методов оперативного контроля и управления формированием шва при лазерной сварке. В качестве регистрируемого сигнала предлагается использование вторичного тока в лазерной плазме. Параметры процессов, протекающих в лазерной плазме, находятся в тесной взаимосвязи

с процессами взаимодействия лазерного луча с металлом и его парами в канале проплавления, что открывает возможности для изучения этих процессов. Также появляется возможность оперативного контроля за процессом сквозного проплавления при лазерной сварке.

Проведенные исследования показывают возможность регистрации параметров плазменного факела путем размещения коллектора заряженных частиц с лицевой стороны сварного соединения. Это позволяет проводить оценку высокочастотных процессов в системе «лазерный луч – плазменный факел – канал проплавления».

Методика, разработанная на кафедре «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета, основанная на оперативной регистрации плазменных потоков, возникающих под обрабатываемым изделием, впервые обеспечивает эффективный контроль сквозного проплавления при импульсной лазерной сварке металлов малых толщин.

Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания Министерства науки и образования РФ (грант № 11.1196.2014/К).

Список литературы

1. Импульсная шовная сварка / А.Г. Бузмаков [и др.] // Электронная промышленность. – 1976. – Вып. 1. – С. 45–51.
2. Веденов А.А., Гладуш Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 208 с.
3. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
4. Криштал М.А., Жуков А.А., Кокора А.Н. Структура и свойства сплавов, обработанных излучением лазера. – М.: Металлургия, 1973. – 192 с.
5. Райзер Ю.П. Лазерная искра и распространение разрядов. – М.: Наука, 1974. – 307 с.
6. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 592 с.
7. Взаимодействие мощного лазерного излучения с плазмой / Ю.В. Афанасьев, Н.Г. Басов, О.Н. Крохин [и др.] // Итоги науки и техники. Радиотехника. – М., 1978. – Т. 17. – С. 298.

8. Рентгеновская спектроскопия лазерной плазмы / В.А. Бойко [и др.] // Итоги науки и техники. Радиотехника. – М., 1980. – Т. 27. – С. 264.
9. 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.
10. Зуев И.В. Обработка материалов концентрированными потоками энергии. – М.: Изд-во МЭИ, 1997. – 437 с.
11. Миркин Л.И. Физические основы обработки материалов лучами лазера. – М.: Изд-во МГУ, 1975. – 383 с.
12. Гуреев Д.М., Ямщиков С.В. Основы физики лазеров и лазерной обработки материалов: учеб. пособие / Самар. ун-т. – Самара, 2001. – 392 с.
13. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. Лазерная техника и технология: в 7 кн. Кн. 5. Л17. Лазерная сварка металлов: учеб. пособие для вузов / под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Высш. шк., 1988. – 206 с.
14. Лазерная сварка в вакууме – перспективная сварочная технология изготовления изделий ответственного назначения / И.Ю. Летягин, Е.М. Федосеева, Е.Г. Колева, В.Я. Беленький, Г.М. Младенов, Д.Н. Трушников // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2014. – Т. 16, № 4. – С. 71–81.
15. 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.
16. 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 // AIP Advances. – 2014. – Vol. 4, iss. 4. – P. 4–10.
17. Компьютерное проектирование и подготовка производства сварных конструкций: учеб. пособие для вузов / С.А. Куркин, В.М. Ховов, Ю.Н. Аксенов [и др.]; под ред. С.А. Куркина, В.М. Ховова. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2002. – 464 с.
18. Ерофеев В.А. Прогнозирование качества электронно-лучевой и лазерной сварки на основе компьютерного моделирования / под общ. ред. В.А. Судника, В.А. Фролова / Тул. гос. ун-т. – Тула, 2002. – 140 с.

References

1. Buzmakov A.G. [et al.] Impul'snaia shovnaia svarka [The pulse seam welding]. *Elektronnaia promyshlennost'*, 1976, iss. 1, pp. 45-51.
2. Vedenov A.A., Gladush G.G. Fizicheskie protsessy pri lazernoi obrabotke materialov [Physical processes in laser material processing]. Moscow: Energoatomizdat, 1985. 208 p.
3. Grigor'iants A.G. Osnovy lazernoi obrabotki materialov [Fundamentals of laser materials processing]. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 304 p.
4. Krishtal M.A., Zhukov A.A., Kokora A.N. Struktura i svoistva spлавov, obrabotannykh izlucheniem lazera [The structure and properties of alloys treated with the laser radiation]. Moscow: Metallurgiya, 1973. 192 p.
5. Raizer Iu.P. Lazernaia iskra i rasprostranenie razriadov [Laser spark discharges and distribution]. Moscow: Nauka, 1974. 307 p.
6. Raizer Iu.P. Fizika gazovogo razriada [Physics of gas discharge]. Moscow: Nauka, 1987. 592 p.
7. Afanas'ev Iu.V., Basov N.G., Krokhin O.N. Vzaimodeistvie moshchnogo lazernogo izlucheniia s plazmoi [The interaction of intense laser radiation with plasma]. *Itogi nauki i tekhniki: Radiotekhnika*. Moscow, 1978, vol. 17, p. 298.
8. Boiko V.A. [et al.] Rentgenovskaia spektroskopiia lazernoi plazmy [X-ray spectroscopy of laser plasma]. *Itogi nauki i tekhniki. Radiotekhnika*. Moscow, 1980, vol. 27, p. 264.
9. Vinogradov B.A., Gavrilenko V.N., Libenson M.N. Teoreticheskie osnovy vozdeistviia lazernogo izlucheniia na materialy [Theoretical basis of laser irradiation on materials]. Blagoveshchenskii politekhnicheskii universitet, 1993. 344 p.
10. Zuev I.V. Obrabotka materialov kontsentririvannymi potokami energii [Material Processing concentrated streams of energy]. Moskovskii energeticheskii institut, 1997. 437 p.
11. Mirkin L.I. Fizicheskie osnovy obrabotki materialov luchami lazera [Physical basics of material processing laser beams]. Moskovskii gosudarstvennyi universitet, 1975. 383 p.
12. Gureev D.M., Iamshchikov S. V. Osnovy fiziki lazerov i lazernoi obrabotki materialov [Fundamentals of physics of lasers and laser processing of materials]. Samarskii universitet, 2001. 392 p.
13. Grigor'iants A.G., Shiganov I.N. Lazernaia tekhnika i tehnologiia. Kniga 5. L17. Lazernaia svarka metallov [Laser equipment and technology. Book 5. Laser welding of metals]. Moscow: Vysshaia shkola, 1988. 206 p.

14. Letiagin I.Iu., Fedoseeva E.M., Koleva E.G., Belen'kii V.Ia., Mladenov G.M., Trushnikov D.N. Lazernaia svarka v vakuume – perspektivnaia svarochnaia tekhnologiia izgotovleniia izdelii otvetstvennogo naznacheniiia [Laser welding in vacuum – promising welding technology manufacturing products-duty]. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie, 2014, vol. 16, no. 4, pp. 71-81.

15. Belen'kii V.Ia., Trushnikov D.N. Issledovanie formirovaniia signala vtorichnogo toka v plazme pri elektronno-luchevoi svarke s ostsilliat-siei elektronnogo puchka [Study secondary current signal forming plasma by electron-beam welding with an electron beam oscillation]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2012, no. 11, pp. 9-13.

16. 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. *AIP Advances*, 2014, vol. 4, iss. 4, pp. 4-10.

17. Kurkin S.A., Khovov V.M., Aksenov Iu.N. Komp'iuternoe proektirovanie i podgotovka proizvodstva svarynykh konstruktсии [Computer-aided design and manufacture of welded structures]. Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni N.E. Baumana, 2002. 464 p.

18. Erofeev V.A. Prognozirovaniie kachestva elektronno-luchevoi i lazernoi svarki na osnove komp'iuternogo modelirovaniia [Prediction quality electron beam and laser welding on the basis of computer modeling]. Tul'skii gosudarstvennyi universitet, 2002. 140 p.

Получено 20.01.2016

Об авторах

Летягин Игорь Юрьевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: letyagin@pstu.ru.

Федосеева Елена Михайловна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: fedoseeva.pstu@mail.ru.

About the authors

Igor Iu. Letiagin (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department “Welding Production and Structural Materials Technology”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: letyagin@pstu.ru.

Elena M. Fedoseeva (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department “Welding Production and Structural Materials Technology”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: fedoseeva.pstu@mail.ru.