

УДК 621.791.72

В.Я. Беленький, Д.Н. Трушников,**Е.М. Федосеева, И.Ю. Летягин**Пермский национальный исследовательский
политехнический университет**Г. Младенов**

Институт электроники Болгарской академии наук, г. София, Болгария

Е. Колева

Химико-технологический и металлургический университет, г. София, Болгария

**ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА В ВАКУУМЕ – ПЕРСПЕКТИВНАЯ
СВАРОЧНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ
ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Лазерная сварка относится к методам сварки плавлением, а по плотности энергии – к высококонцентрированным источникам энергии, таким как электронно-лучевая и плазменная сварка. Интерес к лазерной сварке обусловлен преимуществами, которые выгодно отличают ее от других методов сварки, такими как: зона термического влияния при лазерной сварке очень мала, что обеспечивает сохранение свойства исходного материала и минимальные деформации обрабатываемых изделий; высокая точность и производительность процесса лазерной сварки; при лазерной сварке обеспечивается значительная глубина провара при небольшой ширине сварного шва; оборудование и расходы на эксплуатацию для лазерной сварки требуют гораздо меньших капиталовложений, чем для ближайшего аналога – электронно-лучевой сварки.

В настоящее время лазерная сварка в основном применяется для сварки изделий небольших толщин. В статье рассмотрено современное состояние исследований в области лазерной сварки в вакууме, обеспечивающей высокую эффективность проплавления металла по сравнению с лазерной сваркой с использованием защиты зоны сварки инертными газами. Показаны преимущества лазерной сварки в вакууме перед электронно-лучевой сваркой, конкуренция с которой возможна при снижении стоимости мощных технологических лазеров.

Ключевые слова: лазерная сварка, осцилляции, технологические лазеры, вакуум, волоконные лазеры, высокая точность процесса, дисковые лазеры, режим фокусировки, диаметр пучка.

V.Y. Belenky, D.N. Trushnikov, E.M. Fedoseyeva, I.Y. Letyagin

Perm National Research Polytechnic University

G. Mladenov

Institute of Electronics of Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

E. Koleva

University of Chemical Technology and Metallurgy, Sofia, Bulgaria

LASER WELDING IN A VACUUM – PROMISING WELDING MANUFACTURING TECHNIQUES FOR CRITICAL APPLICATIONS

Laser welding is the method of fusion welding, and on the energy density – a highly concentrated energy sources – such as electron beam and plasma welding. Interest in laser welding due advantages that distinguish it from other welding methods such as: heat-affected zone during laser welding is very small, this ensures that the properties of the starting material and minimum deformation of workpieces; High accuracy and productivity of the process of laser welding; laser welding provides a significant depth of penetration at small width of the weld; equipment and operating costs for laser welding require a much smaller investment than the closest analogue – electron beam welding.

Currently, laser welding is mainly applied to welding products of small thickness. The paper considers the current state of research in the field of laser welding in a vacuum, provide high efficiency metal penetration compared to laser welding using welding protection zone with inert gases. The advantages of laser welding in vacuum to electron beam welding, the competition which is possible while reducing the cost of high-power industrial laser.

Keywords: laser welding, oscillations, industrial lasers, vacuum, fiber lasers, high precision process, disk lasers, focus mode, the beam diameter.

В последние годы все более широкое применение в промышленности при изготовлении деталей ответственного назначения находит лазерная сварка – процесс получения неразъемного соединения путем сплавления примыкающих друг к другу поверхностей свариваемых частей с помощью излучения лазера. Лазерная сварка относится к методам сварки плавлением, а по плотности энергии – к высококонцентрированным источникам энергии, таким как электронно-лучевая и плазменная сварка.

Высокая концентрация теплового воздействия, высокие скорости роста и уменьшения температуры в зоне обработки, а также возможность быстрого образования сварочной ванны в заданном объеме позволяют эффективно применять излучение лазера для реализации сварочного процесса.

Большой интерес к лазерной сварке обусловлен рядом преимуществ, которые выгодно отличают ее от других методов сварки:

- зона термического влияния при лазерной сварке очень мала, что обеспечивает сохранение свойства исходного материала и минимальные деформации обрабатываемых изделий;

- высокая точность и производительность процесса лазерной сварки достигается при сварке любых марок сталей и разнородных материалов;

- при лазерной сварке обеспечивается значительная глубина провара при небольшой ширине сварного шва;

- оборудование и расходы на эксплуатацию для лазерной сварки требуют гораздо меньших капиталовложений, чем для ближайшего аналога – электронно-лучевой сварки.

В настоящее время лазерная сварка в основном применяется для сварки изделий небольших толщин.

До последнего десятилетия в качестве источника мощного лазерного излучения использовались СО₂-лазеры. Однако большие габариты, относительно невысокий КПД и наличие потерь энергии лазерного луча в плазменном факеле в зоне воздействия луча на металл сдерживали широкое внедрение лазерной сварки при изготовлении толсто-стенных изделий.

Интерес к лазерному лучу как инструменту для сварки больших толщин металла в значительной степени возрос при появлении мощных технологических оптоволоконных лазеров. Несмотря на довольно высокую в настоящее время цену они обладают значительными преимуществами перед СО₂-лазерами. У оптоволоконных лазеров длина волны на порядок меньше, чем у СО₂-лазеров (1,075 мкм против 10,6 мкм), что обуславливает меньшее потребление энергии. Кроме того, оптоволоконные лазеры обеспечивают высокую степень надежности и качества, новые прикладные исследования в технологии оптоволоконных лазеров предполагают тенденцию к снижению стоимости оборудования и увеличение его КПД.

В последнее время наилучшее решение для технологического применения в многокиловаттном диапазоне мощностей дают дисковые лазеры. Принцип работы дискового лазера основан на использовании охлаждаемого активного элемента в форме диска. Высокая эффективность охлаждения лазерной среды обеспечивается за счет большой

площади поверхности диска, что важно с точки зрения процесса теплообмена. Мощность излучения в пучке дискового лазера может достигать достаточно высоких значений.

Преимущество дискового лазера перед волоконным состоит в том, что большая излучающая поверхность дискового лазера даже при высоких значениях пиковой мощности обеспечивает высокую эксплуатационную надежность, в то время как у волоконного лазера повышение пиковой мощности негативно влияет на эксплуатационную надежность резонатора. Также существенным недостатком волоконного лазера является его высокая чувствительность к отраженному лучу, который часто возникает при взаимодействии генерируемого излучения с веществом. При этом воздействие отраженного от мишени излучения на резонатор волоконного лазера часто приводит к выходу его из строя. В то же время резонатор дискового лазера нечувствителен к попаданию отраженных лучей.

При постоянной температуре активного лазерного элемента дискового лазера достигаемая средняя выходная мощность прямо пропорциональна площади зоны накачки и, соответственно, площади сечения лазерного луча на диске. Это является уникальной особенностью дисковых лазеров и позволяет менять плотность мощности при постоянной энергии луча на диске. Данное свойство особенно важно для многокиловаттных источников, потому что оно позволяет регулировать значение пиковой мощности излучения, не изменяя при этом многие другие параметры, оказывающие влияние на работоспособность системы в целом.

Важным преимуществом мощного дискового лазера является также его модульная конструкция. Она позволяет заменять отдельные модули для сервисного обслуживания, гарантируя, что время простоя и стоимость ремонтных работ будут минимальны. У волоконного лазера, напротив, из-за моноблочной конструкции резонатора нельзя быстро заменить вышедший из строя модуль без трудоемкой переделки всей системы.

Одним из перспективных направлений лазерных технологий является сварка концентрированным лазерным лучом в вакууме, которая позволяет получить бездефектные сварные швы с высоким отношением глубины шва к его ширине. Исследования физических процессов, протекающих при лазерной сварке в вакууме, с целью создания эффек-

тивных сварочных технологий, согласно данным зарубежных литературных источников, в настоящее время только начинаются.

При ведении сварочного процесса лазерным лучом в вакууме глубина проплавления может быть увеличена в 2–3 раза по сравнению с лазерной сваркой в атмосфере. До последнего времени в связи с высокой стоимостью лазерного оборудования и с его низкими энергетическими характеристиками использование данного процесса считалось нецелесообразным, и акцент делался на применение электронно-лучевой сварки. Вместе с тем лазерный луч обладает рядом принципиальных преимуществ.

Во-первых, лазерный луч значительно меньше взаимодействует с атомами остаточных газов и паров металла из зоны обработки. Это позволяет вести процесс в низком вакууме. Электронно-лучевая сварка требует остаточного давления паров в камере 10^{-1} – 10^{-2} Па. Лазерная сварка в среде с пониженным давлением проявляет свои преимущества уже при давлениях около 1 кПа и при давлениях порядка 100 Па дает результаты, практически неотличимые от результатов при 10^{-1} Па. Указанное преимущество позволяет отказаться от использования молекулярных насосов и значительно повышает технологичность процесса. Кроме того, это значительно упрощает создание мобильных локальных форвакуумных систем, которые могут применяться для сварки крупногабаритных изделий. Так, на сварочном конгрессе в Сингапуре в одном из докладов были представлены результаты первых опытов по применению лазерной сварки с использованием локальных форвакуумных установок для соединения частей мачт ветряных электростанций, габариты которых исключают использование полноценных вакуумных камер.

Вторым важным, возможно, принципиальным, преимуществом является отсутствие чувствительности лазерного луча к магнитным полям. Проблема электронно-лучевой сварки изделий, в которых возможно наличие остаточной намагниченности, до сих пор не решена. Системы предварительного наведения на стык не работают, так как в процессе сварки происходит нагрев изделий с размагничиванием отдельных участков и конфигурация магнитных полей изменяется. Надежной системы автоматического ведения по стыку во время процесса электронно-лучевой сварки не создано. Кроме того, вопрос отклонения электронного луча в толще материалов принципиально неразрешим. Следует отметить, что данное отклонение наблюдается

не только при сварке магнитных, но и при сварке разнородных материалов, когда магнитное поле генерируется возникающими в результате термоЭДС токами. Применение лазерного луча для получения глубокого проплавления открывает также принципиально новые возможности по управлению гидродинамикой сварочной ванны с помощью постоянных и переменных магнитных полей.

Применение электронно-лучевой сварки сопряжено с трудностью воспроизведения режима фокусировки. Существует сильная зависимость параметров фокусировки от мощности электронного луча. Ситуация осложняется и тем, что в электронно-лучевых установках положение минимального диаметра пучка может неконтролируемо изменяться по мере износа катодного узла или при его плановых переборках. Лазерные системы обладают значительно более стабильными параметрами фокусировки по сравнению с электронно-лучевыми. Отклонения параметров в этом случае невелики и могут быть обусловлены только изменением оптических свойств фокусирующей линзы при ее нагреве. Кроме того, при лазерной сварке параметр фокусировки получается менее значимым в связи с более интенсивными переотражениями лазерного луча в канале проплавления.

Меньшее влияние на лазерный луч атомов остаточных газов и паров металла из зоны обработки обуславливает более стабильное формирование сварного шва. Так, проблема корневых дефектов при лазерной сварке стоит менее остро по сравнению с электронно-лучевой сваркой. Кроме того, в качестве дополнительных достоинств лазерной сварки можно отметить отсутствие рентгеновского излучения и возможность соединения неметаллических изделий.

Первые попытки ведения процесса лазерной сварки в вакууме относятся ко второй половине 80-х гг. [1, 2]. В работах, имеющих описательный характер, было отмечено увеличение глубины проплавления и изменение формы шва.

Дальнейшее исследование процесса лазерной сварки в вакууме [3–8] было обусловлено появлением технологии лазерной сварки в вакууме как объекта практического использования, в том числе и для изделий больших габаритов.

При ведении лазерной сварки в вакууме на первое место выходит важность управления режимом фокусировки. Данный параметр в лазерной сварке ранее считался малозначимым, луч фокусировали на поверхности изделия, что во многом было связано с малыми толщинами

свариваемых изделий. При лазерной сварке в вакууме заглупление фокуса существенно влияет на геометрические параметры проплавления.

Важным вопросом при лазерной сварке больших толщин в вакууме является устранение корневых дефектов. Указанные дефекты в целом знакомы специалистам в области лазерной сварки, но при ведении процесса в вакууме их количество возрастает. Могут быть использованы методы борьбы с корневыми дефектами, которые широко применяются в технологиях электронно-лучевой сварки (периодические воздействия на луч [9–10], выбор оптимальной фокусировки [10–13] и т.п.).

Дополнительным фактором, сдерживающим развитие технологий лазерной сварки в вакууме, является недостаток физических моделей сопутствующих процессов. Механизм повышения глубины проплавления при понижении внешнего давления до сих пор является дискуссионным, а сложность происходящих явлений требует проведения численных экспериментов на самом современном уровне. Так, в работе [14] предложен метод определения формы парогазового канала при лазерной сварке на основе расчета энергетического равновесия пошаговым приближением. В [15] предложено распространение данной методики на случай электронно-лучевой сварки. В работах [16, 17] представлены теоретические основы численного моделирования стационарного проплавления лазерным лучом, а в работе [18] сделан упор на фундаментальной стороне исследований. Найденные аналитические решения совместно с использованием численных решений для упрощенных постановок [19, 20] способствовали разработке прикладного программного продукта LaserCad [19], предназначенного для использования на производстве при прогнозировании результатов лазерной сварки.

Результаты моделирования процесса лазерной сварки в однофазной постановке представлены в работе [21], обобщающей более чем пятилетние исследования авторов. Но, несмотря на достигнутые успехи в моделировании динамики течения расплава в сварочной ванне, в данной модели отсутствуют возможности описания влияния осцилляций или других периодических воздействий на геометрию проплавления и на вероятность появления таких дефектов, как пикообразование в корне шва.

Таким образом, исследование процессов, протекающих при лазерной сварке в вакууме, является актуальной задачей, обуславливающей разработку высокоэффективных технологий лазерной сварки изделий ответственного назначения.

Список литературы

1. Fundamental phenomena during vacuum laser welding / Y. Arata, N. Abe, T. Oda, N. Tsujii // Proc. of ICALEO'85 Materials Processing Symp., Laser Inst. of America. – 1985. – Vol. 44. – P. 1–7.
2. Fundamental Study of Laser Plasma Reduction Method in High Power CO₂ Laser Welding / T. Ishide, S. Shono, T. Ohmae, H. Yoshida, A. Shinmi // Proc. Of LAMP '87, HTSJ & JLPS, Osaka. – 1997. – P. 3–12.
3. Deep Penetration Welding with High-Power Laser under Vacuum / S. Katayama, Y. Abe, M. Mizutani, Y. Kawahito // Transactions of JWRI. – 2011. – Vol. 40 (1). – P. 15–19.
4. Development of deep penetration welding technology with high brightness laser under vacuum / S. Katayama, A. Yohei, M. Mizutani, Y. Kawahito // Physics Procedia. – 2011. – Vol. 12, part A. – P. 75–80.
5. Reisinger U., Olschok S., Longeric S. Laser Beam Welding in Vacuum – A Process Variation in Comparison with Electron Beam Welding // 29th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, October 10–13, Anaheim, USA (ICALEO' 2010). – P. 130–136.
6. Reisinger U., Olschok S., Jakobs S. A comparison of electron beam welding with laser beam welding in vacuum // 9th International Conference Beam Technology: Proceedings of International Conference, 24–25 April 2013, Garmisch, Germany. – 2013. – P. 119–127.
7. Katayama S., Kawahito Y., Mizutani M. Latest progress in performance and understanding of laser welding // Physics Procedia. – 2012. – Vol. 39. – P. 8–16.
8. Punshon C., Smith S. Development of Local Vacuum Technology for the Application of Power Beam Welding to Massive Structures // Proceedings of International Congress “7th Asia Pacific IAW International Congress 2013”, Singapore, 8–10 July 2013. – P. 430–435.
9. Effect of beam deflection oscillations on the weld geometry / D.N. Trushnikov [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2013. – Vol. 213, no. 9. – P. 1623–1634.
10. Effect of electron beam oscillations on the formation of the structure and properties of the welded joint / T.V. Ol'shanskaya [et al.] // Welding International. – 2013. – Vol. 27, no. 11. – P. 881–885.
11. Plasma charge current for control and monitoring at electron beam welding with the beam oscillation / V. Trushnikov, V. Belenkiy, A. Schavlev, A. Piskunov, A. Abdulin, G. Mladenov // Sensors. – 2012. – Vol. 12, no. 12. – P. 1733–1744.

12. Trushnikov D.N., Mladenov G.M., Belenkiy V.Ya. Controlling the Electron Beam Focus Regime and Monitoring the Keyhole in Electron Beam Welding // Quarterly journal of the Japan Welding Society. – 2013. – Vol. 31, no. 4. – P. 91–95.

13. Trushnikov D.N., Belen'kii Ya.V. Investigation of the formation of the secondary current signal in plasma in electron beam welding with oscillations of the electron beam // Welding International. – 2013. – Vol. 27, iss. 11. – P. 877–880. doi:10.1080/09507116.2013.796645.

14. Kaplan A. A model of deep penetration laser welding based on calculation of the keyhole profile // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1994. – Vol. 27. – P. 1805–1814.

15. DebRoy T. Physical processes in fusion welding // Rev. Mod. Phys. – 1995. – Vol. 67, no. 1. – P. 85–112.

16. Sudnik W., Radajz D., Erofeev W. Computerized simulation of laser beam welding, modelling and verification // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1996. – Vol. 29. – P. 2811–2817.

17. Sudnik W., Erofeev W., Radaj D., Breitschwerdt S. Numerical simulation of weld pool geometry in laser beam welding // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2000. – Vol. 33, no. 6. – P. 662–671.

18. Theoretical description of dynamic phenomena in laser welding with deep penetration / V.A. Lopota [et al.] // 6th International Conference on Industrial Lasers and Laser Applications'98. International Society for Optics and Photonics.

19. Лопота В.А., Сухов Ю.Т., Туричин Г.А. Компьютерное моделирование лазерной сварки для применений в технологии // Изв. РАН. Серия физическая. – 1997. – Т. 61, № 8. – С. 1613–1618.

20. Моделирование динамического поведения сварочной ванны при лазерной и гибридной сварке с глубоким проплавлением / Г.А. Туричин, Е.А. Валдайцева, Е.Ю. Поздеева, Е.В. Земляков, А.В. Гуменюк // Автоматическая сварка. – 2008. – № 7. – С. 15–19.

21. Numerical simulation of molten pool dynamics in high power disk laser welding / W.-I. Cho, S.-J. Na, C. Thomy, F. Vollertsen // Journal of Materials Processing Technology. – 2012. – Vol. 212. – P. 262–275.

Получено 10.11.2014

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

Трушников Дмитрий Николаевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Сварочное производство и технологии конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: trdimitr@yandex.ru

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

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

Младенов Георги (София, Болгария) – доктор физических наук, профессор, член-корреспондент Болгарской академии наук; e-mail: gmmladenov@abv.bg

Колева Елена (София, Болгария) – доктор наук, Химико-технологический и металлургический университет; e-mail: eligeorg@abv.bg

Belenky Vladimir (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department "Welding Production and Technology of Structural Materials", Perm National Research Polytechnic University; e-mail: vladimirbelenkij@yandex.ru

Trushnikov Dmitriy (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Senior Researcher, Department "Welding Production and Technology of Structural Materials", Perm National Research Polytechnic University; e-mail: trdimitr@yandex.ru

Fedoseyeva Elena (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Docent, Department "Welding Production and Technology of Structural Materials", Perm National Research Polytechnic University; e-mail: fedoseeva.pstu@mail.ru

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

Mladenov Georgi (Sofia, Bulgaria) – Doctor of Physical Sciences, Professor, corresponding member of Bulgarian Academy of Sciences, Institute of Electronics, Bulgarian Academy of Sciences; e-mail: gmmladenov@abv.bg

Koleva Elena (Sofia, Bulgaria) – Doctor of Sciences, University of Chemical Technology and Metallurgy; e-mail: eligeorg@abv.bg