

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ГЛУБИНУ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ СТАЛЕЙ

Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук, И.Ю. КОБОЗЕВ, магистрант

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: ludmila.a@mail.ru

© Афанасьева Л.Е., Кобозев И.Ю., 2021

Рассматриваются возможности бесконтактного воздействия на процесс лазерной сварки с помощью внешнего электрического поля. Приведена схема установки. Представлены экспериментальные данные о влиянии внешнего электрического поля на глубину проплавления при лазерной сварке заготовок конструкционных сталей.

Ключевые слова: лазерная сварка, лавинная ионизация, плазменный факел, глубина проплавления, электрическое поле.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-4-32-37

ВВЕДЕНИЕ

При лазерной сварке металлических материалов в атмосфере защитных газов He, Ar, CO₂ образуется плазма, оказывающая на лазерное излучение экранирующее, поглощающее и расфокусирующее действие [1–4]. В результате снижается экономическая эффективность технологии лазерной сварки, изменяется форма шва и глубина проплавления. С увеличением мощности лазерного излучения процесс плазмообразования усиливается, наблюдается тенденция к заметному уменьшению глубины проплавления металла. При сварке заготовок толщиной более 10 мм повышение интенсивности лазерного излучения нередко приводит к пробоем плазмы, кипению и выплеску металла из сварочной ванны [1–3].

Чтобы уменьшить негативное влияние плазмы, часто используют ее непрерывный сдув струей гелия или других инертных газов. Однако из-за повышенного расхода и высокой стоимости инертных газов производство сварных конструкций лазерной сваркой становится дорогостоящим.

Значительная роль в формировании плазменного факела принадлежит процессам лавинной ионизации, в связи с чем стали возникать предложения по управлению этими процессами с помощью внешних электрических и магнитных полей, способных воздействовать на движение свободных электронов и положительных ионов в прилегающих к обрабатываемой поверхности объемах газа.

В ряде статей рассматриваются возможности использования внешних электрических и магнитных полей в качестве альтернативного метода контроля плазмы [3–9]. Результаты экспериментов показали, что магнитное поле может заметно влиять на экранирующий эффект плазмы без газа, сдувающего плазму. В работе [3] было установлено, что при низкой напряженности внешнего магнитного поля глубина проплавления увеличивалась примерно на 7 %, и не было выявлено значительной разницы в ширине сварных швов. Кроме того, было показано, что эффективность использования энергии при обработке мощным лазерным излучением в значительной степени определяется плазменными явлениями [3].

В работе [4] авторы создали трехмерную численную модель и провели экспериментальные исследования влияния продольного магнитного поля на ванну расплава при лазерной сварке сплава Mg-Al. Были исследованы морфология и распределение элементов в поперечном сечении ванны расплава. Результаты моделирования показали, что под влиянием внешнего магнитного поля градиент температуры ванны расплава уменьшается, т.е. распределение тепла становится более равномерным, а площадь сечения сварного шва увеличивается. Кроме того, наблюдается увеличение скорости течения ванны расплава. Экспериментально установили, что под действием продольного магнитного поля глубина проплавления при сварке возрастает, формируются сварные швы симметричной формы, а конвекция жидкого металла в ванне расплава ускорена.

Цель настоящей работы – провести экспериментальные исследования влияния внешнего электрического поля на процессы лазерной сварки конструкционных сталей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводили на базе лаборатории лазерной сварки Института проблем лазерных и информационных технологий РАН (г. Шатура Московской области). Использовали технологическую лазерную установку модели ТЛ-5М производства ЗАО «Лазерные комплексы». Длина волны лазерного излучения – 10,6 мкм, форма излучения – кольцо, апертура излучения – 50 мм, линза – КС1 (фокусное расстояние – 200 мм).

Сварку производили на листе углеродистой стали марки 15 (ГОСТ 1050-2013) толщиной 1,0 мм и нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632-2014) толщиной 1,2 мм. Режимы сварки: мощность излучения – 1 кВт; скорость сварки – 1,5 м/мин; расход защитного газа аргона – 5 л/мин. Постоянный ток подавался от источника питания Б5-47 напряжением 30 В.

Контроль глубины проплавления осуществлялся путем наблюдения микроструктуры на поперечных сечениях сварных швов. Металлографические исследования выполняли с помощью оптического микроскопа МИМ-8 с цифровой камерой.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эффективному использованию лазеров большой мощности в сварке препятствует образование плазмы. Плазма существует как внутри каверны, так и над поверхностью свариваемого металла. Установлено [1], что приповерхностная плазма (эрозионный факел) не обладает стабильностью в течение процесса сварки и изменяет свое положение относительно места входа луча в сварочную каверну. При этом она не экранирует лазерное излучение. Определяющее воздействие на лазерное излучение при сварке металла больших толщин оказывает плазма каверны, особенно та ее часть, которая возвышается над поверхностью свариваемого металла.

Температура плазмы может быть от 4 000 до 22 000 °С и зависит от интенсивности подведенной энергии [1, 6]. При высоких температурах частицы, образующие плазму (электроны, ионы), находятся в хаотическом тепловом движении с высокими скоростями. Согласно оценкам, выполненным в работе [10], скорость электронов значительно (более чем в 50 раз) превышает скорость ионов, в результате чего эти два типа частиц разделяются. Электроны концентрируются в основном в области сопла, а ионы – вблизи поверхности обрабатываемого металла.

При выполнении сварки по телу в настоящей работе измеряли силу тока плазмы между стальным листом и соплом. Возникновение плазменного тока в электрической

цепи обусловлено разницей в скоростях движения электронов и ионов. Схема установки представлена на рис. 1. Величина плазменного тока – около 0,8–1 мА для стали 15 и около 0,5 мА для нержавеющей стали.

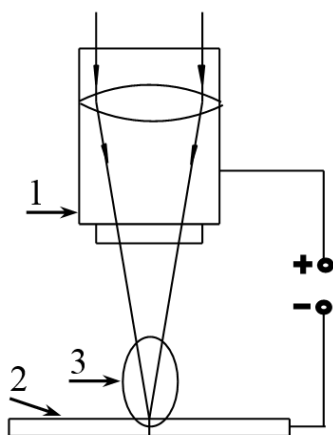


Рис. 1. Схема установки: 1 – сопло;
2 – стальная заготовка; 3 – плазменный факел

На рис. 2 и 3 показаны микроструктуры поперечных сечений сварных швов на углеродистой и нержавеющей стали, полученных при наложении электрического поля на область сварки и без поля. Параметры сварки устанавливались таким образом, чтобы глубина проплавления была несколько меньше толщины листа. Анализ изображений микроструктуры сварных соединений показал, что для обоих материалов воздействие электрическим полем приводит (при прочих равных условиях) к увеличению глубины проплавления.

Характер формирования шва зависит в основном от двух факторов: подвода теплоты и условий теплоотвода [1, 2]. При сварке нержавеющей стали в верхней части формируется шов чашеобразной формы, в центральной и корневой части проплавление носит кинжальный характер. Обычно при лазерной сварке наблюдается неравномерное распределение теплоты по сечению шва. Это выражается в градиенте температур по высоте и поперечному сечению сварочной ванны, а также различном времени пребывания расплава t при температуре выше температуры плавления. Наиболее высокая температура нагрева наблюдается в чашеобразной верхней части шва. Неравномерность температуры нагрева и времени t приводит к уширению верхней части шва и формированию кинжальной формы проплавления в центральной части.

Условия теплоотвода в центральной зоне шва отличаются от условий теплоотвода в чашеобразной части. В центральной и нижней частях сварного шва теплопередача осуществляется в основной металл. В верхней чашеобразной зоне теплоотвод происходит посредством теплопередачи в основной металл и конвективных потоков при взаимодействии с газовой защитой шва. Теплоотвод конвективными потоками осуществляется менее интенсивно в сравнении с теплопередачей в тело металла. Таким образом, кристаллизация в процессе сварки происходит поступательно по высоте шва.

При сварке нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т наложение внешнего электрического поля привело к увеличению глубины проплавления на 8 % в сравнении со сварными швами, полученными без поля (рис. 2). При сварке углеродистой стали 15 наложение внешнего электрического поля привело к увеличению глубины

проплавления до 15 % (рис. 3). Форма поперечного сечения сварной зоны при данных параметрах сварки существенных изменений не претерпела.

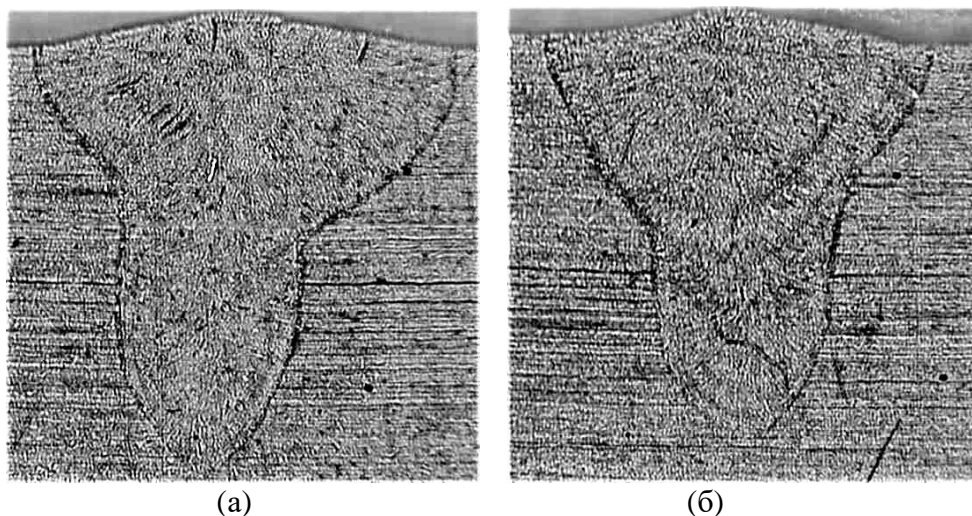


Рис. 2. Макрошлифы сварных швов на нержавеющей стали марки 12X18H10T: с наложением постоянного тока напряжением 30 В (а); без тока (б). Увеличение – х40

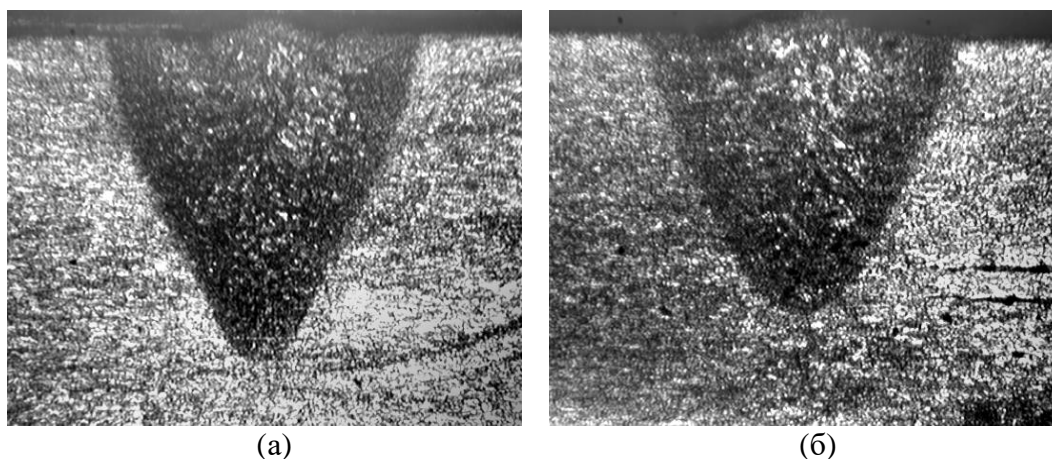


Рис. 3. Макрошлифы сварных швов на углеродистой стали 15: с наложением постоянного тока напряжением 30 В (а); без тока (б). Увеличение – х40

Результаты проведенной работы показывают положительное влияние внешнего электрического поля на глубину проплавления при лазерной сварке и необходимость систематического изучения его влияния в широком диапазоне значений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективность использования энергии при лазерной сварке можно значительно повысить, применяя внешнее электрическое поле для управления процессом плазмообразования. После выполнения работы было получено заметное увеличение глубины проплавления (8–15 %) при лазерной сварке конструкционных сталей под влиянием внешнего электрического поля. Результаты исследований рекомендуется использовать при лазерной сварке материалов больших толщин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грезев А.Н. Плазмообразование при лазерной сварке с глубоким проплавлением // *Сварочное производство*. 2005. № 5. С. 20–25.
2. Грезев А.Н. Формирование парогазового канала сварочной ванны при лазерной сварке // *Сварочное производство*. 2005. № 6. С. 13–17.
3. Tse H.C., Man H.C., Yue T.M. Effect of magnetic field on plasma control during CO₂ laser welding // *Optics & Laser Technology*. 1999. V. 31. № 5. P. 363–368.
4. Zhou J., Zhou D., Liu J. Numerical and experimental investigation of magnesium/aluminum laser welding with magnetic field // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. P. 1–15.
5. Zhang X., Zhao Z., Wang C., Yan F., Hu X. The effect of external longitudinal magnetic field on laser-MIG hybrid welding // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. V. 85. № 5. P. 1735–1743.
6. Chen G., Zhang M., Zhao Z., Zhang Y., Li S. Measurements of laser-induced plasma temperature field in deep penetration laser welding // *Optics & Laser Technology*. 2013. V. 45. P. 551–557.
7. Jiang M., Tao W., Wang S., Li L., Chen Y. Effect of ambient pressure on interaction between laser radiation and plasma plume in fiber laser welding // *Vacuum*. 2017. V. 138. P. 70–79.
8. Afanas'eva L.E., Barabonova I.A., Zorenko P.O., Yakovlev I.A., Grechishkin R.M., Grezev A.N., Grezev N.V. Laser welding in external electrical and magnetic fields // *Welding International*. 2013. V. 27. № 7. P. 545–547.
9. Афанасьева Л.Е., Зигерт А.Д., Иванова А.И., Гречишкин Р.М. Магнитооптическая визуализация дефектов сварных соединений // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 1 (5). С. 13–20.
10. Peng Y., Chen W., Wang C., Bao G., Tian Z. Controlling the plasma of deep penetration laser welding to increase power efficiency // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2001. V. 34. № 21. P. 3145–3149.

Для цитирования: Афанасьева Л.Е., Кобозев И.Ю. Влияние внешнего электрического поля на глубину проплавления при лазерной сварке сталей // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 4 (12). С. 32–37.

INFLUENCE OF EXTERNAL ELECTRIC FIELD ON THE DEPTH OF PENETRATION IN LASER WELDING OF STEELS

L.E. AFANASIEVA, Cand. Sc., I.Yu. KOBOZEV, undergraduate

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: ludmila.a@mail.ru

Possibilities of non-contact control of laser welding with the aid of external electric field are considered. Schemes of coupling the field sources with laser technological installations are given. Experimental results on the effect of external electric field on laser welding of structural steel blanks are presented.

Keywords: laser processing, avalanche ionization, plasma torch, welding depth, electric field.

REFERENCES

1. Gresev A.N. Plasma formation in laser welding with deep penetration. *Svarochnoye proizvodstvo*. 2005. No. 5, pp. 20–25. (In Russian).
2. Gresev A.N. Formation of a vapor-gas channel of the weld pool during laser welding. *Svarochnoye proizvodstvo*. 2005. No. 6, pp. 13–17. (In Russian).
3. Tse H.C., Man H.C., Yue T.M. Effect of magnetic field on plasma control during CO₂ laser welding. *Optics & Laser Technology*. 1999. V. 31. No. 5, pp. 363–368.
4. Zhou J., Zhou D., Liu J. Numerical and experimental investigation of magnesium/aluminum laser welding with magnetic field. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021, pp. 1–15.
5. Zhang X., Zhao Z., Wang C., Yan F., Hu X. The effect of external longitudinal magnetic field on laser-MIG hybrid welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. V. 85. No. 5, pp. 1735–1743.
6. Chen G., Zhang M., Zhao Z., Zhang Y., Li S. Measurements of laser-induced plasma temperature field in deep penetration laser welding. *Optics & Laser Technology*. 2013. V. 45, No. 5, pp. 551–557.
7. Jiang M., Tao W., Wang S., Li L., Chen Y. Effect of ambient pressure on interaction between laser radiation and plasma plume in fiber laser welding. *Vacuum*. 2017. V. 138, pp. 70–79.
8. Afanas'eva L.E., Barabonova I.A., Zorenko P.O., Yakovlev I.A., Grechishkin R.M., Grezev A.N., Grezev N.V. Laser welding in external electrical and magnetic fields. *Welding International*. 2013. V. 27. No. 7, pp. 545–547.
9. Afanasieva L.E., Zigert A.D., Ivanova A.I., Grechishkin R.M. Magneto-optical visualization of welded joints defects. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2020. No. 1 (5), pp. 13–20. (In Russian).
10. Peng Y., Chen W., Wang C., Bao G., Tian Z. Controlling the plasma of deep penetration laser welding to increase power efficiency. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2001. V. 34. No. 21, pp. 3145–3149.

Поступила в редакцию/received: 21.09.2021;
после рецензирования/reviced: 05.10.2021; принята/accepted: 11.10.2021