

УДК 621.791

DOI: 10.37890/jwt.vi77.416

Вопросы технологии лазерной сварки концов теплообменных труб в трубных решетках.

Е.В. Гринев¹

С. Н. Валиулин¹

А.А. Хлыбов²

ORCID 0000-0002-6559-7819

Ю.И. Матвеев³

¹*ООО «Гидротермаль» г. Нижний Новгород, Россия*

²*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия*

³*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. В работе показано, что надежность и ресурс судовых теплообменных аппаратов во многом зависит от качества закрепления теплообменных труб в трубных решетках. Методы крепления труб в трубной решетке зависят от многих факторов: типа теплообменного аппарата, материала из которого изготовлены трубы и трубные решетки, толщины труб и трубных решеток, технологические возможности с учетом выбранной конструкции и др. Одним из эффективных способов крепления труб в трубных решетках теплообменных аппаратов является сварка. Сварные швы отличаются прочностью, технологичностью, обеспечивают высокий ресурс соединения.

В статье, для выполнения сварных соединений, предлагается использовать лазерную сварку. Лазерная сварка обеспечивает высокую сфокусированную плотность энергии, сосредоточенную на участке очень малой площади при относительно малом энерговыделении и прогреве прилегающих слоев металла. При лазерной сварке, нет сильного ионизирующего излучения, намагниченность заготовок не влияет на лазерный пучок, что является актуальным при сварке магнитных материалов. Воздействие лазерного излучения высоколокально, проводится на воздухе, в том числе в среде защитных газов. Благодаря этому лазерную сварку можно без проблем применять для соединения крупногабаритных металлоконструкций.

Лазерный луч с помощью зеркальных оптических систем или по световоду легко транспортируется и направляется в труднодоступные места. При этом обеспечивается надежное и оперативное управление процессом лазерной сварки с регулируемыми энергетическими характеристиками. В статье приводится описание технологического оборудования, которое может использоваться для сварки теплообменных труб и трубных решеток.

Ключевые слова: лазер, лазерная сварка, теплообменные трубы, трубные решетки, защитная среда.

Issues of laser welding technology of the ends of heat exchange pipes in pipe gratings

Evgeniy V. Grinev¹

Sergey N. Valiulin¹

Alexander A. Khlybov²

ORCID 0000-0002-6559-7819

Yuri I. Matveev³

¹*LLC "Hydrothermal" Nizhny Novgorod, Russia*

²*Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia*

³*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract. The paper shows that the reliability and service life of shipboard heat exchangers largely depends on the quality of fixing heat exchange pipes in pipe grids. The methods of fixing pipes in a pipe grid depends on many factors: the type of heat exchanger, the material from which the pipes and pipe grids are made, the thickness of pipes and pipe grids, technological capabilities taking into account the chosen design, etc. One of the most effective ways of fixing pipes in the tube grids of heat exchangers is welding. Welds are characterized by strength, manufacturability, and provide a high service life of the joint.

In the article, it is proposed to use laser welding to perform welded joints. Laser welding provides a high focused energy density concentrated on a very small area with relatively low energy input and heating of adjacent metal layers. In laser welding, there is no strong ionizing radiation, the magnetization of the workpieces does not affect the laser beam, which is relevant when welding magnetic materials. The effect of laser radiation is highly local, carried out in the air, including in the environment of protective gases. Thanks to this, laser welding can be used without problems to connect large-sized metal structures.

The laser beam is easily transported with the help of mirror optical systems or through a light guide and is directed to hard-to-reach places. At the same time, reliable and operational control of the laser welding process with adjustable energy characteristics is provided. The article describes the technological equipment that can be used for welding heat exchange pipes and pipe gratings.

Keywords: laser, laser welding, heat exchange pipes, pipe gratings, protective environment.

Введение

Надежность и ресурс судовых теплообменных аппаратов во многом зависят от качества закрепления теплообменных труб в трубных решетках. [1, 2. 3] Метод крепления труб в трубной решетке либо коллекторе, выполняющем функцию подвода и распределения теплоносителя по системе теплообменных труб зависит от многих факторов. Среди них: тип теплообменного аппарата, материал из которого изготовлены трубы и трубные решетки, толщина труб и трубных решеток, технологические возможности с учетом выбранной конструкции и др.

В данной работе рассматриваются методы крепления труб в автономных водогрейных, паровых и утилизационных котлах. Материал труб и трубных решеток в этих аппаратах, как правило, сталь с пониженным содержанием углерода (например, сталь 10). Этот материал обладает хорошей свариваемостью, технологичен и отличается неплохой коррозионной стойкостью. На рис. 1 и 2 приведены характерные конструктивные варианты исполнения узлов крепления теплообменных труб в котлах типа КАВ и КУП.

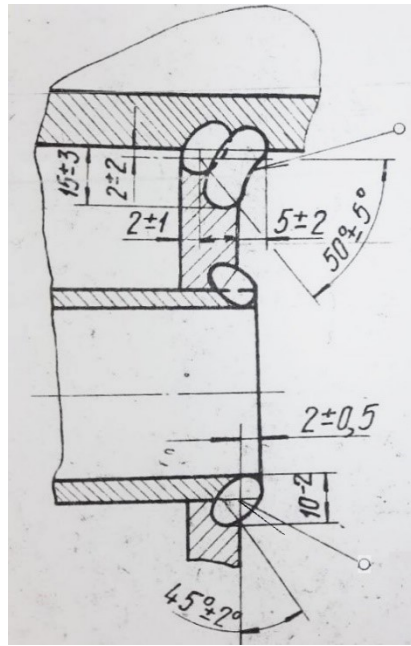


Рис. 1. Сварное соединение трубы с трубной решеткой в котлах типа КАВ

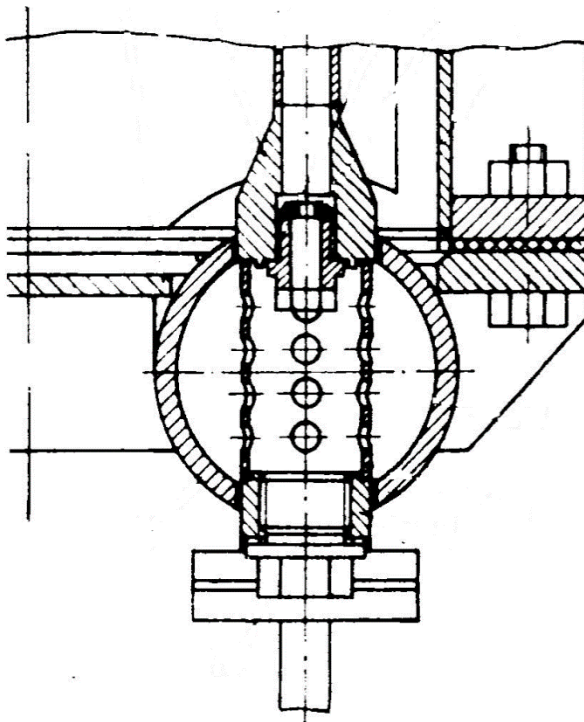


Рис. 2. Сварные соединения в котлах типа КУП

Одним из эффективных способов крепления труб в трубных решетках теплообменных аппаратов является сварка.

Сварные швы отличаются прочностью, технологичностью, обеспечивают высокий ресурс соединения. В некоторых случаях сварному соединению просто нет альтернативы.

До настоящего времени для выполнения сварных соединений использовалась сварка покрытым электродом, неплавящимся электродом в среде защитных газов, полуавтоматическая и автоматическая сварка орбитальными аппаратами.

К сожалению, все эти виды сварки обладают одним серьезным недостатком, глубина проплавления соединений трубы с трубной решеткой не велика и равна толщине стенки трубы. Последние достижения технологии сварки с оптимизацией величины сварочного тока, формы исполнения и другого позволяют улучшить этот параметр, например, увеличить показатель относительной глубины проплавления до 1,4...1,6 толщины. Однако разработка теплообменных аппаратов, эксплуатируемых при высоких параметрах давления и температуры, требует относительной глубины проплавления до 2... 3 толщин теплообменной трубки.

Решить эту задачу можно с применением лазерной сварки. [4, 5, 6, 8, 9,] Лазерная сварка обеспечивает высокую сфокусированную плотность энергии, сосредоточенную на участке очень малой площади при относительно малом энергозатражении и прогреве прилегающих слоев металла. При быстром перемещении пятна контакта лазерного луча обеспечивается большая глубина сварочной ванны.

Рассмотрим некоторые аппаратные и технологические решения для сварных соединений с применением лазерных установок.

Конструкция и виды применяемого оборудования

Лазерное излучение обеспечивает высокую концентрацию энергии, значительно превосходящую другие источники энергии, используемые для сварки [10, 11]. Лазерная сварка в большинстве случаев не требует вакуумных камер, хотя при мощностях более 5–25 кВт местное вакуумирование позволило бы увеличить глубину лазерной сварки в несколько раз. Кроме того, при лазерной сварке, нет сильного ионизирующего излучения, намагниченность заготовок не влияет на лазерный пучок, что позволяет более точно наводить его на стык при сварке. Воздействие лазерного излучения высоколокально. Лазерная сварка проводится на воздухе, а чаще – в среде защитных газов Ar, He, CO₂, N₂ и др. Благодаря этому лазерную сварку можно без проблем применять для соединения крупногабаритных металлоконструкций.

Лазерный луч с помощью зеркальных оптических систем или по световоду легко транспортируется и направляется в труднодоступные места. При этом обеспечивается надежное и оперативное управление процессом лазерной сварки с регулируемыми энергетическими характеристиками. Благодаря широкому диапазону режимов ЛС реализуется высокопроизводительный процесс соединения различных металлов толщиной от нескольких микрон до десяти и более миллиметров.

1. Использование гальвано-сканирующего устройства

Для рассматриваемых в работе конструкциях может быть использована гальвано-сканирующая головка для промышленного лазера (т. е., для волоконного, дискового, диодного или CO₂ лазера) пригодная для работы с оптической мощностью лазерного луча до 1000-2000 Вт. [10, 11] Такие промышленные гальвано-сканирующие головки производятся германскими предприятиями SCANLAB GmbH, RAYLASE GmbH и MOEWE Optical Solutions GmbH. Среди американских производителей промышленных лазерных гальвано-сканеров и их контроллеров лидирующие позиции занимает компания Aerotech Inc.. В последние годы выпуск гальвано-сканирующих

головок для промышленной лазерной обработки материалов налажен также в КНР (например, Sino Galvo Scanner и пр.).

Выходной луч гальвано-сканера распространяется «по воздуху» и фокусируется на поверхности, в том числе под поверхностью или над поверхностью, стыка свариваемых деталей. Рабочее расстояние (длина оптического пути лазерного луча) от выходной линзы гальвано-сканера до поверхности свариваемой детали может составлять от 200 до 1000 мм. В случае детали на Рис.2 сварка может проводиться через отверстие под углом $45^\circ - 50^\circ$, что является единственным решением в соединении такой сложной конфигурации.

В рассматриваемом гальвано-сканере внутреннее пространство полой стальной детали может быть заполнено инертным газом (sealing gas) для предотвращения окисления сварочного шва. Для лазерной сварки нержавеющей стали обычно используется Аргон.

Гибкость программирования сложных контуров движения фокусного пятна

Программное обеспечение гальвано-сканера обеспечивает гибкое перемещение лазерного пятна вдоль стыка свариваемых деталей. В ряде случаев для обеспечения высокого качества и высокой однородности сварного шва при лазерной сварке используют мелко-зигзагообразное или мелко-волнистое движение лазерного пятна при его поступательном перемещении вдоль стыка свариваемых деталей (при этом, ширина сварного шва будет определяться амплитудой мелко-волнистого или мелко-зигзагообразного движения фокусного пятна). Кроме этого, может использоваться также движение лазерного фокусного пятна по сложному контуру в виде перекрывающихся окружностей очень малого радиуса (радиус окружности должен быть немного больше радиуса фокусного пятна; ширина сварного шва при этом будет определяться радиусом этих перекрывающихся окружностей).

1.1. Гальвано-сканер на 5-осевом роботе-манипуляторе

Наиболее универсальной системой для сварки данной детали по внутреннему сварному стыку (Рис.1, 2) может быть система, основанная на использовании гальвано-сканирующего устройства, закрепленного на 5-осевом роботе-манипуляторе. При лазерной сварке робот-манипулятор поворачивает гальвано-сканирующее устройство («гальвано-сканер») в пространстве относительно неподвижной свариваемой детали так, чтобы в области прямой видимости гальвано-сканера всегда находилась та дуга (часть) стыка дна и стенок полой детали, которую в данный момент должен сваривать луч, направляемый подвижным зеркалом гальвано-сканера во внутрь детали. Гальвано-сканирующее устройство на 5-осевом роботе-манипуляторе позволяет задавать различные режимы лазерной сварки и может быть легко адаптирована (перепрограммирована) для автоматизированной сварки любых сложных деталей. В том числе возможна сварка «Laser Wobble Welding» с прохождением луча по зигзаго-образной траектории вдоль стыка деталей, быстрого многократного прохождения луча вдоль линии стыка, сварки «волнистой линией», «перекрывающимися окружностями» и пр.

Высокое качество сварки обеспечивается за счёт полной автоматизации процесса. Для этого на роботе-манипуляторе используется датчик для автоматического

распознавания линии стыка свариваемых деталей. Это позволяет автоматизировать процесс сварки и исключить возможность брака (некачественной сварки) за счёт человеческого фактора (ошибок оператора).

Если устройство распознавания линии стыка свариваемых деталей не применяется, то оператор может самостоятельно запрограммировать роботу-манипулятора для данной конкретной геометрии детали и геометрии сварочного стыка. Тем самым, оператор сообщит роботу-манипулятору по какой пространственной трехмерной траектории робот должен будет перемещать гальвано-сканирующее устройство (или обычный сварочный объектив) относительно неподвижной детали. Такое программирование робота производится с помощью специального щупа, который закрепляется на роботе-манипуляторе. Оператор должен вручную привести манипулятор в движение так, чтобы щуп прошелся по линии стыка свариваемых деталей по всей длине стыка.

1.2. Гальвано-сканер на 2-координатной системе движения

Более простой и менее дорогостоящей системой для сварки данной детали по внутреннему сварному стыку (см. Рис.1) может быть система, основанная на использовании гальвано-сканирующего устройства, закрепленного на 2-х координатной системе движения. Такая 2-х координатная система движения состоит из «Линейной координаты Z » и «Угловой координаты θ ».

- «Линейная координата» представляет собой систему движения для вертикального линейного перемещения гальвано-сканирующего устройства по координате Z . Такая система движения может быть основана на использовании «шарико-винтовой пары» или «шестерни и рейки» с соответствующими электронными контроллерами движения и интерфейсами для подключения к системе ЧПУ.
- «Угловая координата» представляет собой поворотное устройство, обеспечивающее поворот гальвано-сканирующего устройства в вертикальной плоскости (в плоскости ZX или ZY).
- Примечание: «Угловая координата» крепится на «линейной координате». Это обеспечивает возможность линейного вертикального перемещения «угловой координаты» по оси Z и возможность фиксации её в требуемой рабочей точке по оси Z . При этом, гальвано-сканирующее устройство крепится непосредственно на «Угловую координату». При такой конфигурации «Линейная координата» будет обеспечено вертикальное линейное перемещение гальвано-сканирующего устройства, соединённого с «угловой координатой», и фиксацию его в требуемой рабочей точке по координате Z . После остановки «Линейной координаты» в рабочей точке оси Z нужно будет обеспечить такой поворот «Угловой координаты» на угол θ в вертикальной плоскости (в плоскости ZX или ZY), чтобы наклонить гальвано-сканирующее устройство и совместить оптическую ось его выходной линзы с линией визирования на стык свариваемых частей внутри полой детали.

Преимущество гальвано-сканера на 2-х координатной системе движения: простота и низкая стоимость. При этом, благодаря возможности выбора различных режимов работы гальвано-сканера, такая система позволяет программно задавать различные режимы лазерной сварки со сложной траекторией прохождения вдоль линии стыка свариваемых деталей, включая «зигзаго-образные» или «волнистые» траектории, а также траектории в виде последовательности «перекрывающихся окружностей» и пр.).

Существенным недостатком гальвано-сканера на 2-х координатной системе движения является невозможность полной автоматизации процесса лазерной сварки и исключения брака за счёт ошибок оператора.

2. Использование сварочного объектива со свободным выходным лучом

Для задачи лазерной сварки стальных деталей может быть использован сварочный объектив со свободным выходным лучом, рассчитанный на работу с оптической мощностью лазерного луча на уровне до 1000-2000 Вт. [12,13, 14]

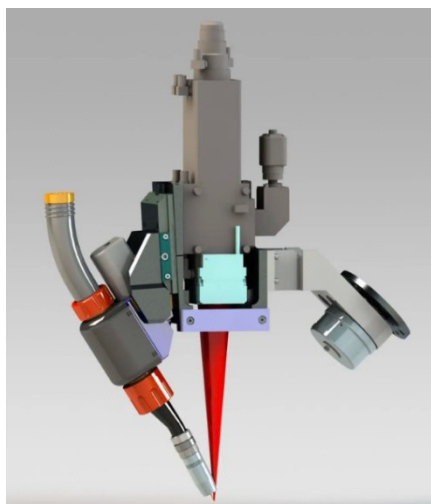


Рис. 3. Пример конфигурации лазерного сварочного объектива со свободным выходным лучом © www.directindustry.com.

Преимущества сварочных объективов (Рис.3) со свободным выходным лучом является то, что: все лазерные сварочные объективы оборудованы:

- системами автоматического распознавания линии стыка свариваемых деталей,
- CCD-камерами для мониторинга и видео-регистрации процесса сварки,
- системами автоматического изменения фокусного расстояния и
- системами автоматического изменения диаметра фокусного пятна.
- ряд моделей сварочных объективов оборудованы оптическими системами управления осциллирующей траекторией движения фокусного пятна вдоль линии стыка свариваемых деталей для обеспечения движения фокусного пятна по траектории в виде «перекрывающихся окружностей», «зигзагов» и пр. (см. Рис. 4).

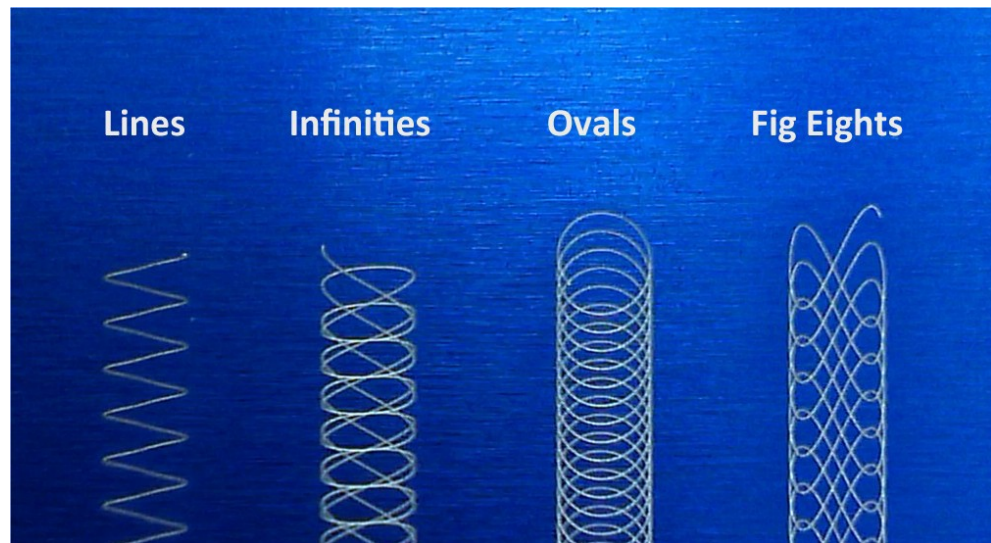


Рис. 4. Примеры траекторий движения фокусного пятна при лазерной сварке с осцилляцией фокусного пятна (англ., Laser Wobble Welding) © Polaris Laser Wobble Technology.

2.1. Сварочный объектив на 5-осевом роботе манипуляторе

Одной из наиболее универсальных систем для лазерной сварки может быть система, основанная на использовании лазерного сварочного объектива со свободным лучом, закрепленного на 5-осевом роботе-манипуляторе. При лазерной сварке робот-манипулятор поворачивает лазерный сварочный объектив в пространстве относительно неподвижной свариваемой детали так, чтобы оптическая ось выходной линзы объектива всегда совпадала с линией визирования на тот сегмент дуги стыка дна и стенок стальной детали, который в данный момент должен сваривать выходной сфокусированный луч объектива.

Преимуществом робота-манипулятора со сварочным объективом на 5-осевом роботе-манипуляторе является универсальность, возможность программно задавать различные режимы лазерной сварки. Такая система может быть легко адаптирована (перепрограммирована) для автоматизированной сварки любых других сложных деталей. За счёт применения современных лазерных сварочных объективов со свободным лучом обеспечивается возможность сварки с:

- автоматическим распознаванием линии стыка свариваемых деталей,
- визуализацией и видео-регистрацией процесса формирования сварного шва,
- программируемой траекторией осцилляции фокусного пятна,
- автоматическим изменением фокусного расстояния и
- автоматическим изменением диаметра фокусного пятна.

Применение роботизированной системы (лазерного сварочного объектива со свободным лучом на 5-осевом роботе-манипуляторе) позволяет полностью автоматизировать процесс сварки и исключить возможность брака (некачественной сварки) за счёт человеческого фактора (ошибок оператора).

Перед началом работы оператор осуществляет программирование [15] робота-манипулятора для данной конкретной геометрии детали и геометрии сварочного стыка. Тем самым, оператор сообщает роботу-манипулятору по какой пространственной трехмерной траектории и под каким углом робот должен будет

перемещать лазерный сварочный объектив относительно неподвижной детали. Такое программирование робота производится с помощью специального тактильного щупа, который закрепляется на роботе-манипуляторе. Оператор должен вручную привести манипулятор в движение так, чтобы щуп прошелся по линии стыка свариваемых деталей по всей длине стыка. Благодаря этому робот запомнит и сохранит в своей памяти всю трехмерную траекторию движения и каждый раз будет воспроизводить её при сварке каждой новой детали данного типа.

2.2. Сварочный объектив на 2-координатной системе движения

В качестве более простой и менее дорогостоящей системы для сварки детали может быть использована система, основанная на применении лазерного сварочного объектива со свободным лучом, закрепленного на 2-х координатной системе движения.

Конфигурация вышеуказанной 2-х координатной системы движения аналогична случаю 2-х координатной системы движения для гальвано-сканирующего устройства, рассматривали в 1.2

А именно, такая 2-х координатная система движения должна состоять из «Линейной координаты Z » и «Угловой координаты θ ».

- «Линейная координата Z » должна представлять собой систему движения для
- вертикального линейного перемещения сварочного объектива по координате Z и может быть основана на использовании «шарико-винтовой пары» или «шестерни и рейки» с соответствующими электронными контроллерами движения и интерфейсами для подключения к системе ЧПУ.
- «Угловая координата θ » должна представлять собой поворотное устройство,
- обеспечивающее поворот сварочного объектива в вертикальной плоскости (в
- плоскости ZX или ZY).
- Крепление объектива и координат:

(а) Крепление угловой координаты: для обеспечения возможности линейного вертикального перемещения поворотного устройства «Угловой координаты θ » и для обеспечения возможности его фиксации в требуемой рабочей точке оси Z необходимо закрепить поворотное устройство «Угловой координаты θ » на механическом интерфейсе (крепёжной плите) «Линейной координаты Z »;

(б) Крепление объектива: для обеспечения возможности углового визирования лазерного сварочного объектива по углу места θ на линию стыка свариваемых деталей с высоты фиксированной координаты Z необходимо закрепить объектив непосредственно на механическом интерфейсе (крепёжной плите) поворотного устройства «Угловой координаты θ ». При такой конфигурации крепления объектива и координат (см выше пункты (а) и (б)) «Линейная координата Z » будет обеспечивать вертикальное линейное перемещение сварочного объектива, соединённого с «Угловой координатой θ », и фиксацию его в требуемой рабочей точке по оси Z . После остановки «Линейной координаты Z » в рабочей точке оси Z нужно будет обеспечить такой поворот «Угловой координаты θ » на «угол места» θ в вертикальной плоскости (в плоскости ZX или ZY), чтобы наклонить сварочный объектив и совместить оптическую ось его выходной

линзы с линией визирования на стык свариваемых частей внутри полой детали.

Преимущества системы «объектив на 2-х координатной системе движения»:

данная система является простой и недорогостоящей. При этом, благодаря возможности использования встроенных функций сварочного объектива такая система позволит программно задавать различные режимы лазерной сварки и обеспечить высокое качество сварки с опциями:

- автоматического распознавания линии стыка свариваемых деталей,
- визуализации и видео-регистрации процесса формирования сварного шва,
- программирования траектории осцилляции фокусного пятна (Laser Beam Wobbling),
- автоматического изменения фокусного расстояния,
- автоматического изменения диаметра фокусного пятна.

Недостатки системы «объектив на 2-х координатной системе движения»:

Данная система не позволяет полностью автоматизировать процесс лазерной сварки и исключить брак за счёт ошибок оператора. Данная система также не является универсальной и не может быть адаптирована к задачам лазерной сварки металлических деталей со сложной геометрией.

3. Использование дефлектора луча

В случае если *глубина* полой части детали, изображённой на Рис.1, 2, превышает *внутренний диаметр* полой части детали и линия стыка свариваемых частей детали не находится в зоне прямой видимости оптики сварочного объектива, то сварочный объектив потребует оборудовать дефлектором луча отражательного типа с водяным охлаждением и защитным стеклом, предотвращающим попадание пыли на отражающую поверхность дефлектора.

Для конструирования такого дефлектора может быть использована коммерческая программа Zemax Optic Studio.

Дефлектор может быть изготовлен из цельной медной заготовки с прорезанными в её толще внутренними каналами для принудительного водяного охлаждения.

Отражающая поверхность дефлектора может быть позолочена. Уровень локальных шероховатостей (расстояние «от пика к впадине») позолоченной отражающей поверхности дефлектора должен быть менее 0.25 рабочей длины волны лазерного излучения.

Дефлекторную часть лазерного объектива необходимо оборудовать защитным стеклом для предотвращения попадания пыли на отражающую поверхность дефлектора.

При необходимости, профилю отражающей поверхности дефлектора можно придать форму параболического зеркала. В этом случае дефлектор нужно будет облучать коллимированным лучом (выходным лучом коллиматора сварочного объектива). Фокусное расстояние и офсетность параболического зеркала следует выбирать с учётом расстояния от вершины параболы до места стыка свариваемых частей полой детали в рабочем положении дефлектора (в положении, когда дефлекторная часть сварного объектива будет находиться в рабочем положении внутри полой части стальной детали).

Выводы

1. Современные лазерные системы сварки с успехом могут быть применены для закрепления труб в стальных аппаратах.

2. Существующие сварочные лазерные системы позволяют выполнить сварку с глубоким проплавлением в труднодоступных местах.
3. Лазерные технологии позволяют автоматизировать процесс сварки, повысить качество сварного шва благодаря снижению содержания в сварном шве продуктов окисления металла, уменьшению зоны термического влияния, снизить энергопотребление сварочного процесса.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 19-19-00332-П «Разработка научно-обоснованных подходов и аппаратно-программных средств мониторинга поврежденности конструкционных материалов на основе подходов искусственного интеллекта для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в Арктических условиях»

Список литературы

1. Хряпченков А.С. Судовые вспомогательные и утилизационные котлы: Уч. Пособие. – 2-е изд. Перераб. и лоп. – Л.: Судостроение, 1988. 296 с.
2. Усов С.В., Шиганов И.Н., Жданов А.В., Точилин И.П., Митрофанов А.Н. Металлофизические исследования поверхностей при лазерной сварке и лазерной резке / Сварочное производство. 2022. № 10. С. 43-50.
3. Васильев А.А., Горский А.И., Орешкин А.А., Осинников А.А., Пономаренко Д.В., Шиганов И.Н. Применение азота в качестве защитного газа при лазерной сварке нержавеющей стали / Сварочное производство. 2022. № 1. С. 22-27.
4. Магдин А.Г., Дюсегалиев Р.М., Припадчев А.Д., Горбунов А.А. Гибридизация лазерной сварки / Транспортное машиностроение. 2022. № 10 (10). С. 12-18.
5. Поливанов А.Ю., Иванов Ю.В., Холин Д.В. Калибровка видеосенсора системы технического зрения промышленного робота для лазерной сварки / Вестник МГТУ "Станкин". 2019. № 2 (49). С. 119-126.
6. Саубанов Р.Р., Звездин В.В., Хисамутдинов Р.М., Портнов С.М. Управление процессом лазерной сварки / Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2020. № 2 (85). С. 47-56.
7. Рахимов Р.Р., Звездин В.В. Прецизионное наведение фокуса лазерного излучения на стык при сварке длинномерных конструкций / Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2021. № 1 (87). С. 74-82.
8. Новиков В.Г. Анализ и расчет параметров процесса лазерной сварки металлических листов с учетом их физико-технических особенностей / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 10. С. 520-522.
9. www.youtube.com/ Обзор лазерных технологических головок для реализации сварки.
10. www.raylase.de Гальвано-сканирующие головки.
11. www.moewe-optics.com Сканирующие головки.
12. www.scanson.com Интеллектуальная лазерная обработка.
13. www.precitec.com Объективы промышленной лазерной сварки.
14. www.ipgphotonics.com Объективы с программируемой траекторией осцилляций.
15. (www.ipgphotonics.com) Лазерные установки программируемой траекторией.

References

1. Khryapchenkov A.S. Ship auxiliary and utilization boilers: Textbook. – 2nd ed. Pererab. and lop. – L.: Shipbuilding, 1988. 296 p.
2. Usov S.V., Shiganov I.N., Zhdanov A.V., Tochilin I.P., Mitrofanov A.N. Metallophysical studies of surfaces in laser welding and laser cutting / Welding production. 2022. No. 10. pp. 43-50.
3. Vasiliev A.A., Gorsky A.I., Oreshkin A.A., Osinnikov A.A., Ponomarenko D.V., Shiganov I.N. Application of nitrogen as a protective gas in laser welding of stainless steel / Welding production. 2022. No. 1. pp. 22-27.

4. Magdin A.G., Dyusegaliev R.M., Pripadchev A.D., Gorbunov A.A. Hybridization of laser welding / Transport engineering. 2022. No. 10 (10). pp. 12-18.
5. Polivanov A.Yu., Ivanov Yu.V., Kholin D.V. Calibration of the video sensor of the vision system of an industrial robot for laser welding / Bulletin of MSTU "Stankin". 2019. No. 2 (49). pp. 119-126.
6. Saubanov R.R., Zvezdin V.V., Hisamutdinov R.M., Portnov S.M. Laser welding process control / Socio-economic and technical systems: research, design, optimization. 2020. No. 2 (85). pp. 47-56.
7. Rakhimov R.R., Zvezdin V.V. Precision focusing of laser radiation on the joint during welding of long structures / Socio-economic and technical systems: research, design, optimization. 2021. No. 1 (87). pp. 74-82.
8. Novikov V.G. Analysis and calculation of the parameters of the laser welding process of metal sheets taking into account their physical and technical features / Proceedings of Tula State University. Technical sciences. 2022. No. 10. pp. 520-522.
9. www.raylase.de Galvano-scanning heads.
10. www.moewe-optics.com Scanning heads.
11. www.scansonic.de Intelligent laser processing.
12. www.precitec.com Industrial laser welding lenses.
13. www.ipgphotonics.com Lenses with programmable oscillation trajectory.
14. (www.ipgphotonics.com) Laser installations with a programmable trajectory.
15. www.youtube.com/watch?v=FMa7JK0jD2c Overview of laser process heads for welding implementation.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Гринев Евгений Владимирович, И.О. главного сварщика ООО «Гидротермаль» 603163, Нижний Новгород, ул. Набережная Гребного Канала, 6, e-mail: kaf_eseu@vsuwt.ru

Evgeniy V. Grinev, Acting Chief welder of LLC "Hydrothermal" Nizhny Novgorod, Russia, e-mail: kaf_eseu@vsuwt.ru

Валулин Сергей Николаевич, к.т.н., технический директор ООО «Гидротермаль» 603163, Нижний Новгород, ул. Набережная Гребного Канала, 6, e-mail: ov_i@inbox.ru

Sergey N. Valiulin Candidate of Technical Sciences, Technical Director of LLC "Hydrothermal" Nizhny Novgorod, Russia, e-mail: ov_i@inbox.ru

Хлыбов Александр Анатольевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: hlybov_52@mail.ru

Alexander A. Khlybov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Materials Science, Materials Technology and Heat Treatment of Metals, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseeva, 603950

Матвеев Юрий Иванович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Эксплуатации судовых энергетических установок», Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: matveeveseu@mail.ru

Yuri I. Matveev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Operation of Ship Power Plants, Volga State University of Water Transport, 603951

ВвеСтатья поступила в редакцию 16.10.2023; опубликована онлайн 20.12.2023.
Received 16.10.2023; published online 20.12.2023.