УДК 621.791.725 Князева И.А. – аспирант Е-mail: <u>iraida_knyazeva@mail.ru</u> Золотоносов Я.Д. – доктор технических наук, профессор Е-mail: <u>zolotonosov@mail.ru</u> Казанский государственный архитектурно-строительный университет Адрес организации: 420127, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1 Лисовский В.А. – кандидат технических наук, доцент Е-mail: <u>vitallis@rambler.ru</u> Вятский государственный университет

Адрес организации: 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36

Получение пружинно-витых каналов теплообменных аппаратов путем лазерной сварки

Аннотация

Для производства пружинно-витых каналов кожухотрубчатых теплообменных аппаратов оптимальной с точки зрения технологических и технико-экономических показателей является технология лазерной сварки. В работе представлены результаты исследований сварных швов, полученных непрерывным и импульсным лазерным излучением в рамках поиска оптимальной технологии изготовления пружинно-витых каналов из стали марки 12Х18Н10Т. Проведен анализ микроструктуры швов, измерена твердость металла в различных зонах сварного шва. Результаты экспериментов показали, что за счет локальных тепловложений и уменьшения размеров сварочной ванны и зон термического влияния, импульсная лазерная сварка позволяет значительно минимизировать влияние напряжений на геометрические параметры пружинно-витых каналов, а также избежать появления трещин, но не в полной мере обеспечивает требуемую глубину проплавления.

Ключевые слова: теплообменные аппараты, пружинно-витой канал, лазерная сварка, импульсное лазерное излучение, непрерывное лазерное излучение, микроструктура сварного шва, твердость.

Процесс модернизации машиностроения неразрывно связан с повышением качества изготовления и сборки заготовок, деталей машин и аппаратов в процессе их производства, улучшением культуры производства, снижением трудоемкости технологических процессов.

На сегодняшний день данный процесс невозможен без привлечения наукоемких технологий. Одним из направлений практического применения наукоемких технологий является внедрение лазерных технологий обработки материалов в промышленность.

Высокая производительность процесса лазерной сварки, малая зона термического влияния, а, следовательно, и невысокие остаточные напряжения, возможность контроля параметров лазерной сварки в каждый момент времени делает возможным производство пружинно-витых каналов высокого качества.

Прямой пружинно-витой канал, представляет собой пружину круглого сечения, витки которой жестко скреплены между собой посредством сварки [1]. Получение таких каналов может быть реализовано путем непрерывной подачи проволоки на направляющее устройство, которое формирует спираль из проволоки таким образом, что витки спирали плотно расположены друг к другу и свариваются посредством лазерной сварки.

Технологические особенности лазерной сварки пружинно-витых каналов были описаны в работах [2-4].

О качестве выполнения сварного соединения можно судить после проведения трех видов контроля.

1. Метрологический контроль геометрических размеров пружинно-витых каналов теплообменных аппаратов, сваренных лазерной сваркой. При этом контролируется:

– длина пружинно-витого канала теплообменного аппарата – 1, мм;

- глубина проплавления - h, мм;

- изменение толщины стенки трубы от фактического диаметра проволоки - t, мм.

После того как сваренное изделие прошло метрологический контроль, то есть все размеры находятся в поле допуска на размер, проводится металлографический контроль сварного соединения.

2. Металлографический контроль сварных соединений пружинно-витых каналов теплообменных аппаратов, выполненных лазерной сваркой. Данный вид контроля выполняется с целью исследования структуры шва и зоны термического влияния, установления наличия или отсутствия дефектов. Характер структуры металла шва позволяет оценить его механические свойства.

3. Пневмогидравлические испытания пружинно-витых каналов теплообменных аппаратов, сваренных лазерной сваркой. Данный вид контроля проводится с целью проверки плотности шва. Гидравлические испытания, помимо проверки плотности швов, дают возможность определить прочность пружинно-витого канала при наибольших нагрузках [3].

Для проверки адекватности математической модели лазерной сварки пружинновитых каналов, предложенной в статьях [5, 6] и правильности подобранных режимов, определения оптимальных параметров лазерной сварки, оценки механических свойств сварного соединения были проведены металлографические исследования.

Были подготовлены два образца пружинно-витого канала: один образец был сварен посредством лазерной сварки непрерывным лазерным излучением, второй – посредством многопроходной лазерной сварки импульсным лазерным излучением.

Мощность излучения (энергия импульса) и скорость сварки подбирались на основании математической модели исходя из требуемой глубины проплавления металла и производительности лазерной сварки.

Способ приготовления микрошлифов заключался в механическом шлифовании и последующем полировании образцов алмазными пастами. Для выявления микроструктуры использовался водный раствор сульфата меди и соляной кислоты следующего состава: сульфат меди – 4 г, соляная кислота – 20 мл, вода – 20 мл. Время травления проката из нержавеющей стали аустенитного класса в значительной степени зависело от химического состава проката и составляло от 1 до 2 минут.

Структура сварных швов (на поперечных микрошлифах) была исследована с помощью оптического микроскопа Neophot 4. Захват изображения осуществлялся с помощью оптической системы Opticam 5. Измерения геометрических параметров проводились с помощью специализированного программного комплекса Optika Vision Pro V.2.7. Твердость сварного шва, зоны термического влияния, основного металла определялась на твердомере типа «Виккерс» при нагрузке 1 кг.



Рис. 1. Общий вид области сварного шва пружинно-витого канала, полученного сваркой непрерывным лазерным излучением



Рис. 2. Общий вид области сварного шва пружинно-витого канала, полученного многопроходной сваркой импульсным лазерным излучением

Как видно из рис. 1, 2, сварной шов, полученный лазерной сваркой непрерывным лазерным излучением, по сравнению со швом, полученным многопроходной сваркой импульсным лазерным излучением, имеет большую глубину проплавления и значительно меньшую зону термического влияния. Ширина сварного шва, полученного непрерывным лазерным излучением, составила 0,7 мм, глубина проплавления – 1,0 мм, при импульсной лазерной сварке ширина сварного шва составила 0,35 мм, а глубина проплавления – 0,5 мм. В сварном шве, полученном сваркой непрерывным лазерным излучением, наблюдаются дефекты в виде пор, во втором же образце не происходит формирования корня шва. Эти дефекты связаны с высокой скоростью сварки, малыми размерами сварного шва и высокими скоростями кристаллизации расплавленного металла. Для устранения подобных дефектов необходимо увеличивать время пребывания металла в жидкой фазе.

Сварные швы, полученные различными способами сварки, имеют также разную структуру. При лазерной сварке пружинно-витого канала непрерывным лазерным излучением формируется мелкозернистая структура шва (рис. 3). Макроструктура сварного соединения состоит из вытянутых кристаллитов, растущих от краев сварочной ванны вглубь шва в направлении отвода теплового потока. Кристаллиты образованы более мелкими дендритами аустенита длиной от 30 до 50 мкм. Зона термического влияния ярко выражена, размер ее составляет порядка 20 мкм. В результате нагрева до высокой температуры от действия сварочного термического цикла вероятно выделение карбидов в зоне термического влияния, о чем свидетельствует более высокое значение твердости в этой зоне по сравнению с основным металлом.

Микроструктура сварного соединения, полученного многопроходной импульсной лазерной сваркой, отличается более высокой дисперсностью (рис. 4). Дендриты в сварочной ванне разориентированы, по своей форме близки к равноосному зерну и имеют размер в среднем 20-30 мкм, что в конечном итоге может положительно повлиять на стойкость к образованию холодных трещин.

На процесс формирования микроструктуры сварного шва и околошовной зоны существенно оказывают влияние параметры термического цикла сварки, количество теплоты, передаваемое свариваемому телу. Вследствие локальности нагрева и ограниченного времени воздействия лазерного излучения наблюдаются отличия, состоящие в высокой дисперсности структурных составляющих и меньших размерах всех зон по сравнению с традиционными видами сварки. Это происходит из-за того, что развитие тепловых процессов, приводящих к нагреву, начинается непосредственно в зоне фокального пятна лазерного излучения на поверхности обрабатываемых материалов и переноса тепловой энергии от поверхности вглубь материала за счет их теплопроводности.



Рис. 3. Микроструктура металла переходной зоны сварного шва пружинно-витого канала, полученного сваркой непрерывным лазерным излучением



Рис. 4. Микроструктура металла переходной зоны сварного шва пружинно-витого канала, полученного сваркой импульсным лазерным излучением

Из методов оценки механических свойств швов, регламентирован и применим в данном случае метод измерения твердости.

Согласно п.4.10.4 ПБ 03-585-03 «Правила проектирования, изготовления и приемки сосудов и аппаратов стальных сварных», твердость металла шва сварных соединений из стали аустенитного класса должна быть не более 200 НВ.

В результате проведенных исследований, твердость основного металла составляет 188..196HV, твердость сварного шва, полученного непрерывным лазерным излучение составляет 163..196HV, твердость переходной зоны – 194..232HV, а импульсным – 174..192HV, 162..175HV соответственно. Таким образом, при импульсной лазерной сварке наблюдается разупрочнение зоны термического влияния.

С уменьшением размера зерна увеличивается количество стыков зерен как возможных источников зарождения межкристаллитной коррозии, но сводится к минимуму вероятность ее глубокого проникновения в металл. С учетом рабочих режимов, имеющих место при работе кожухотрубчатого теплообменного аппарата, можно сказать, что коррозионная стойкость сварного соединения выше уровня коррозионной стойкости основного металла.

В качестве особенности лазерной сварки стоит отметить высокие требования к качеству стыковки свариваемых поверхностей: из-за большого зазора между свариваемыми витками наблюдается недостаточная глубина проплавления.

Выводы

Проведенный металлографический анализ сварных швов, выполненных непрерывным и импульсным лазерным излучением, позволил сделать следующие выводы:

 – более высокое качество сварного шва обеспечивается импульсным лазерным излучением; – при сварке непрерывным лазерным излучением происходит упрочнение зоны термического влияния, повышается склонность к образованию холодных трещин;

– зона термического влияния при однопроходной лазерной сварке непрерывным лазерным излучение значительно меньше, чем при многопроходной импульсной лазерной сварке.

Таким образом, высокое качество шва, снижение влияния сварочных напряжений за счет уменьшения тепловложений позволяют прогнозировать положительные результаты в деле модернизации технологии изготовления пружинно-витого канала кожухотрубчатого теплообменного аппарата из стали 12X18H10T с использованием импульсной лазерной сварки при повышении энергии импульса.

Импульсная лазерная шовная сварка осуществляется с помощью импульсного излучения с высокой частотой следования импульсов. При этом как скорость, так и глубина сварки будут зависеть от теплофизических свойств свариваемых материалов. При средней мощности лазерного излучения 100-200 Вт, частоте следования импульсов до 20-50 Гц и глубине проплавления до 0,3 мм можно выполнять шовную сварку со скоростью до 1,0-1,5 м/мин.

Повысить производительность импульсной лазерной сварки можно за счет увеличения энергии импульса, но необходимо учитывать, что с увеличением энергии излучения в импульсе в современных лазерных установках частота следования импульсов снижается. Для увеличения производительности (скорости) сварки возможно фокусирование излучения не в круглое пятно, а в прямоугольное или овальное [7, 8].

Полученные результаты механических характеристик и микроструктуры сварного шва и зоны термического влияния показывают преимущества лазерной сварки при производстве оборудования данного типа. Высокая степень автоматизации процесса лазерной сварки и высокая производительность работ делают данную технологию перспективной.

Список библиографических ссылок

- 1. Багоутдинова А.Г., Золотоносов Я.Д., Мустакимова С.А. Энергоэффектитвные теплообменные аппараты на базе теплообменных элементов в виде пружинновитых каналов // Известия КГАСУ, 2012, № 3 (21). С. 86-95.
- 2. Чирков А.М, Князева И.А., Багоутдинова А.Г., Золотоносов Я.Д. Применение лазерной сварки для производства кожухотрубчатых теплообменных аппаратов нового поколения на базе пружинно- витых каналов // Известия КГАСУ, 2011, № 3 (21). С. 120-126.
- 3. Чирков А.М., Князева И.А., Золотоносов Я.Д. Технологические особенности лазерной сварки пружинно-витых каналов теплообменных аппаратов // Известия КГАСУ, 2012, № 4 (22). – С. 240-244.
- 4. Чирков А.М., Князева И.А., Золотоносов Я.Д., Багоутдинова А.Г. Применение лазерной сварки для производства кожухотрубчатых теплообменных аппаратов нового поколения на базе пружинно-витых каналов // Известия КГАСУ, 2013, № 1 (23). С. 154-158.
- 5. Князева И.А., Золотоносов Я.Д., Багоутдинова А.Г. Выбор математической модели для описания теплового процесса лазерной сварки пружинно-витых каналов // Известия КГАСУ, 2013, № 3 (25). С. 67-72.
- 6. Князева И.А., Золотоносов Я.Д. Оптимизация мощности лазерного излучения при сварке пружинно-витых каналов // Известия КГАСУ, 2014, № 2 (28). С. 116-120.
- 7. Катаяма С. Справочник по лазерной сварке. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2015. 704 с.
- 8. Мелюков В.В., Чирков А.М., Орехов А.В. Технологии импульсной лазерной сварки // Сварка и диагностика, 2009, № 4. – С. 37-42.

Knyazeva I.A. – post-graduate student
E-mail: <u>iraida_knyazeva@mail.ru</u>
Zolotonosov Ya.D. – doctor of technical sciences, professor
E-mail: <u>zolotonosov@mail.ru</u>
Kazan State University of Architecture and Engineering
The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1
Lisovskii V.A. – candidate of technical sciences, associate professor
E-mail: <u>vitallis@rambler.ru</u>
Vyatka State University
The organization address: 610000, Russia, Kirov, Moscovskaya st., 36

Production of spring-twisted channel of heat exchangers by laser welding

Resume

The article discusses the features of the laser welding of spring-twisted channels with continuous and pulsed laser radiation in the search for the optimal technology for their manufacture of steel AISI 304.

The analysis of the microstructure of joints measured hardness in various zones of the metal weld.

When laser welding the coiled spring-channel continuous laser weld macrostructure consists of elongated crystallites rising edges of the seam weld pool depth in the direction of removal of the thermal flow. The crystallites are formed smaller austenite dendrites length from 30 to 50 microns. Heat affected zone is clearly expressed, it is the size of about 20 microns. Microstructure of welded joints produced multipass pulsed laser welding, characterized by a high dispersion. Dendrites are disoriented in the weld pool, in form close to equiaxed grains and have an average size of 20-30 microns, which ultimately can positively affect resistance to cold cracking.

The experimental results showed that due to local heat input and reducing the size of the weld pool and the heat affected zones, pulse laser welding can significantly minimize the impact of stress on the geometric parameters of the spring-twisted channels as well as to avoid the appearance of cracks, but does not fully provide the desired depth of penetration.

Keywords: heat exchangers, the helical spring-channel laser welding, pulsed laser radiation, a continuous laser beam, the microstructure of the weld, the hardness.

Reference list

- 1. Bagoutdinova A.G., Zolotonosov Ya.D., Mustakimova S.A. Energy-efficient heatexchange devices based on heat-exchange elements in the form of a spring-twisted channels // Izvestiya KGASU, 2012, № 3 (21). – P. 86-95.
- 2. Chirkov A.M., Knyazeva I.A., Bagoutdinova A.G., Zolotonosov Ya.D. The use of laser welding for the production of shell and tube heat exchangers on the basis of a new generation spring-twisted channels // Izvestiya KGASU, 2011, № 3 (21). P. 120-126.
- 3. Chirkov A.M., Knyazeva I.A., Zolotonosov Ya.D. Technological features laser welding spring-twisted-channel heat exchangers // Izvestiya KGASU, 2012, № 4 (22). P. 240-244.
- 4. Chirkov A.M., Knyazeva I.A., Zolotonosov Ya.D., Bagoutdinova A.G. Laser welding for the production of shell and tube heat exchangers on the basis of a new generation of spring-twisted channels // Izvestiya KGASU, 2013, № 1 (23). P. 154-158.
- 5. Knyazeva I.A., Zolotonosov Ya.D., Bagoutdinova A.G. Selecting a mathematical model to describe the heat of the laser welding spring-twisted channels // Izvestiya KGASU, 2013, № 3 (25). P. 67-72.
- 6. Knyazeva I.A., Zolotonosov Ya.D. Optimization of the laser power for welding springtwisted channel // Izvestiya KGASU, 2014, № 2 (28). – P. 116-120.
- 7. Katayama S. Manual laser welding. M.: Technosphere, 2015. 704 p.
- 8. Melyukov V.V., Chirkov A.M., Orehov A.V. Technologies pulsed laser welding // Welding and diagnostics, 2009, № 4. P. 37-42.