



ПРИКЛАДНЫЕ НАУЧНЫЕ РАЗРАБОТКИ

УДК 621.791.72

ИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНО-ДУГОВАЯ СВАРКА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Жерносеков Анатолий Максимович, кандидат технических наук

Старший научный сотрудник отдела «Источники питания», Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, ул. Боженко, 11, г. Киев, ГСП-150, Украина, 03680

E-mail: maximan23@i.ua

Хаскин Владислав Юрьевич, доктор технических наук

Ведущий научный сотрудник отдела «Специализированная высоковольтная техника и лазерная сварка», Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, ул. Боженко, 11, г. Киев, ГСП-150, Украина, 03680

E-mail: khaskin@ua.fm

Набок Тарас Николаевич

Инженер отдела «Специализированная высоковольтная техника и лазерная сварка», Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, ул. Боженко, 11, г. Киев, ГСП-150, Украина, 03680

E-mail: taras_nabok@bigmir.net

В работе приведены результаты исследований, направленные на повышение эффективности гибридной лазерно-дуговой сварки углеродистых сталей. Установлено, что при частотах модуляции импульсной сварочной дуги и лазерного излучения, которые близки к частоте собственных колебаний сварочной ванны, характерных для лазерной сварки, увеличивается глубина проплавления и улучшается формирования верхнего валика усиления шва.

Ключевые слова: стали, лазер, дуга, сварка, электрод, импульс, частота, энергия, ток, проплавление.

В роботі наведено результати досліджень, спрямовані на підвищення ефективності гібридного лазерно-дугового зварювання вуглецевих сталей. Встановлено, що при частотах модуляції імпульсної зварювальної дуги і лазерного випромінювання, які близькі до частоти власних коливань зварювальної ванни, характерних для лазерного зварювання, збільшується глибина проплавлення і поліпшується формування верхнього валика підсилення шва.

Ключові слова: сталі, лазер, дуга, зварювання, електрод, імпульс, частота, енергія, струм, проплавлення.

1. Введение

Углеродистые стали применяются во многих сварных конструкциях. Например, корпуса железнодорожных вагонов или сухогрузы изготавливаются из сталей типа 09Г2С (ГОСТ 19281-89). В кораблестроении, согласно правилам классификации и постройки морских судов, для изготовления ответственных конструкций применяют высокопрочные стали типа АН36, ДН36 [1, 2]. Для менее ответственных конструкций применяют сталь класса А, что соответствует стали типа Ст.3пс (ГОСТ 19903-74). Для уменьшения

объемов либо полного устранения операции финишной рихтовки этих конструкций при сварке необходимо минимизировать остаточные термические деформации. Одной из сварочных технологий, снижающих величину деформаций по сравнению с применяющейся на данный момент дуговой сваркой, является лазерная сварка. Однако, ее широкое внедрение сдерживается высокими требованиями к подготовке свариваемых кромок. Для снижения этих требований целесообразно использовать гибридную лазерно-дуговую сварку с использованием дуги плавящегося электрода [1–3].

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

К недостаткам лазерно-дуговой сварки (по сравнению с лазерной) можно отнести давление дуги на сварочную ванну, а также увеличение перегрева основного металла за счет возрастания поперечных размеров сварного шва [4]. Последний недостаток также может быть вызван некоторым повышением погонной энергии гибридной сварки по сравнению с лазерной [5]. Такое повышение обуславливается необходимостью достижения определенной проплавляющей способности гибридного теплового источника.

Одним из путей устранения указанных недостатков является применение импульсной дуги плавящегося электрода. Таким путем шли авторы работ [6, 7], предложившие стабилизировать импульсную дугу непрерывным лазерным излучением. По мнению авторов, данных работ, дальнейшее снижение погонной энергии гибридной сварки с одновременным сохранением проплавляющей способности может быть достигнуто за счет применения импульсного процесса как дуги, так и лазерного излучения.

3. Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы явилось изучение влияния импульсного лазерного излучения и импульсной дуги плавящегося электрода на проплавляющую способность гибридной лазерно-дуговой сварки углеродистых сталей.

Задачами работы являлись: исследование возможностей улучшения формирования сварного шва, увеличения его глубины и уменьшения теплового воздействия на свариваемый металл за счет применения импульсной модуляции; определение частот модуляции электрической дуги и лазерного излучения.

4. Технологические исследования особенностей проплавления низкоуглеродистой стали

Для проведения экспериментальных исследований был создан лабораторный стенд на базе Nd:YAG-лазера модели DY 044 фирмы Rofin (Германия) мощностью до 4,4 кВт и источника питания для импульсно-дуговой сварки, разработанного в институте электросварки им. Е. О. Патона. Последний обеспечивает специальную форму импульса, которая позволила разделить процессы плавления и переноса электродного металла, обеспечивая режим «один импульс — одна капля» [8] в широком диапазоне частот. Такой режим дал хорошие результаты при импульсно-дуговой сварке плавящимся электродом алюминиевых сплавов

различных систем легирования [8]. В этом источнике питания предусмотрена возможность плавной регулировки частоты импульсов (f_d) в диапазоне 30...300 Гц.

Гибридная сварочная головка была изготовлена таким образом, чтобы реализовать схему, описанную авторами в работе [9]. При сварке электродную проволоку марки Св-08Г2С ($\varnothing 1,2$ мм) подавали спереди относительно перемещения головки. В ходе экспериментов выполнялись наплавки на пластины размером $300 \times 100 \times 5$ мм из стали Ст.3пс в защите газовой смеси 82 % Ar + 18 % CO₂, подаваемой с расходом 20 л/мин (333 см³/мин). Осциллограмма сварочного тока импульсной дуги в процессе гибридной сварки приведена на **рис. 1**.

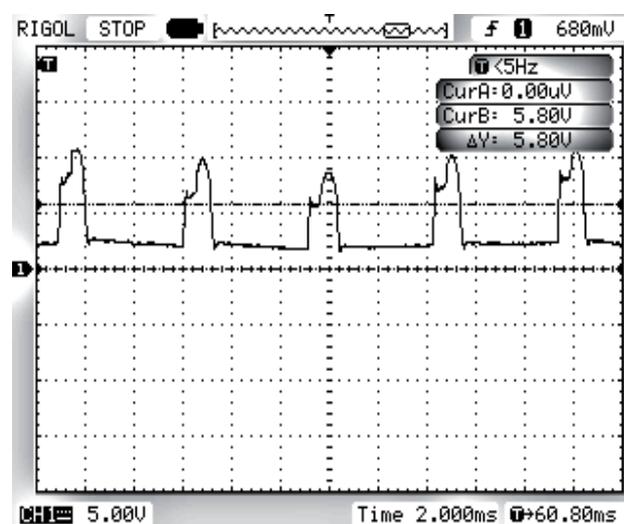


Рис. 1. Осциллограмма сварочного тока импульсного источника питания дуги при гибридной лазерно-дуговой сварке: средний ток 160 А, соотношение частот следования импульсов дуги и импульсов лазерного излучения соответственно:
 $f_d : f_n = 200 : 200$

Как видно из **рис. 1**, форма сварочного тока была ступенчатой для разделения процессов плавления и переноса электродного металла. Лазерное излучение подавали прямоугольными импульсами с соотношением импульс-пауза 66 % : 34 % (скважность 1,5). Для сравнения выполняли провары в непрерывном режиме горения дуги постоянного тока и генерации излучения при близкой погонной энергии. Скорость сварки во всех случаях была выбрана 90 м/ч (25 мм/с), а погонная энергия лежала в пределах 260...300 Дж/мм. Соотношение мощностей дугового и лазерного источников энергии было близким к 1 : 1 (примерно по 3 кВт каждый). Основными критериями оценки получаемых результатов служили качество формирования валиков, а также глубина проплавления.

5. Результаты исследований

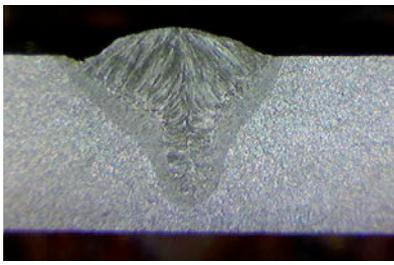
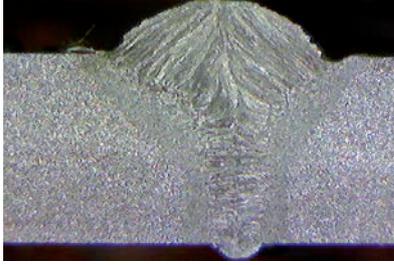
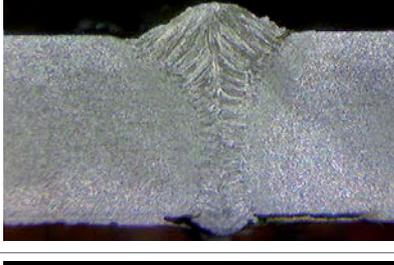
Результаты экспериментов, проведенных для частот 100 и 200 Гц следования импульсов дуги (f_d) и импульсов лазерного излучения (f_l), а также средние значения сварочного тока и напряжения на дуге (I_{cp} , U_{cp}) приведены в **табл. 1**. Выбор этих значений частот обусловливался их близостью к собственным частотам сварочной ванны, наблюдаемых при лазерной сварке [10].

6. Обсуждения результатов исследований

Эксперименты показали, что формирование верхнего валика во всех случаях можно считать удовлетворительным. Хорошее формирование валиков имеет место при равных частотах импульсов дуги и импульсов излучения (например, по 100 Гц), а наилучшее — при превышении частоты импульсов дуги ($f_d : f_l = 200 : 100$). Повышение глубины проплавления наблюдалось при соотношении этих частот $f_d : f_l = 100 : 100$, $200 : 200$ и $200 : 100$.

Таблица 1

Результаты экспериментов по гибридной сварке стали Ст.3пс ($\delta = 5$ мм), проведенных при средней мощности лазерного излучения 3,0 кВт (пиковой — 4,4 кВт) на скорости 90 м/ч с заглублением фокуса 1 мм

№ п/п	Режим	I_{cp} , А	U_{cp} , В	f_d , Гц	f_l , Гц	Макроструктура провара
1	импульсный	160	20...22	100	100	
2	импульсный	160	20...22	100	200	
3	импульсный	160	18...20	200	200	
4	импульсный	160	18...20	200	100	
5	непрерывный	180	24...25	—	—	

Отметим, что при гибридной сварке в непрерывном режиме (погонная энергия 300 Дж/мм) глубина провара уменьшилась на 30 % относительно случаев гибридной сварки с импульсной дугой и импульсным лазерным излучением в соотношениях $f_d : f_l = 100 : 100$ и $200 : 100$ (погонная энергия 260 Дж/мм).

7. Выводы

1. Впервые предложено осуществлять гибридную лазерно-дуговую сварку с одновременной импульсной модуляцией лазерного излучения и дуги плавящегося электрода с частотами, близкими к собственной частоте сварочной ванны. Показано,

что такой подход способствует улучшению формирования верхнего валика сварного шва, увеличению глубины проплавления и уменьшению теплового воздействия на свариваемый металл.

2. Впервые предложено для повышения качества формирования швов при лазерно-дуговой сварке использовать такую форму импульса сварочного тока, в которой разделены процессы плавления и переноса электродного металла.

3. Установлено, что в диапазоне до 200 Гц частоты модуляции дуговых и лазерных процессов наиболее эффективно воздействуют на свариваемый металл, если они равны, либо кратны друг другу с превышением значений частоты следования дуговых импульсов.

Литература

1. Koga, H. First Application of Hybrid Laser-arc Welding to Commercial Ships [Text] / H. Koga, H. Goda, S. Terada et al. // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. — 2010. — Vol. 47, Issue 3. — P. 59–64.
2. Kelly, S. M. Using Hybrid Laser-Arc Welding to Reduce Distortion in Ship Panels [Text] / S. M. Kelly, S. W. Brown et al. // Welding Journal. — 2009. — Vol. 3. — P. 32–36.
3. Ishide, T. Coaxial TIG-YAG & MIG-YAG Welding Methods [Text] / T. Ishide, M. Nayama, M. Watanabe, T. Nagashima // Journal of the Japan Welding Society. Japan Welding Society. — 2001. — Vol. 70, № 4. — P. 394–399. doi:10.2207/qjws1943.70.4_394.
4. Le Guen, E. Analysis of hybrid Nd:Yag laser-MAG arc welding processes [Text] / E. Le Guen, R. Fabbro, M. Carin, F. Coste, P. Le Masson // Optics & Laser Technology. — 2011. — Vol. 43, № 7. — P. 1155–1166. doi:10.1016/j.optlastec.2011.03.002.
5. Хаскин, В. Ю. Определение областей энергетического воздействия, обеспечивающих стабильное протекание процесса гибридной лазерно-дуговой сварки [Текст] : материалы докладов Международного симпозиума, Минск, 12 апреля 2012 г. / В. Ю. Хаскин, В. Д. Шелягин, А. В. Бернацкий и др.; ред. кол. А. Ф. Ильющенко и др. // Сварка и родственные технологии. — Минск, 2012. — С. 30–35.
6. Kaplan, A. F. H. Fundamental analysis of hybrid laser-mig welding [Text] / A. F. H. Kaplan, M. Wouters, K. Nilsson, J. Powell; In: M. Wouters // Proceedings of the Conference EUROJOIN 5, Vienna (Austria), 10–14 June 2004. Hybrid Laser-MIG welding: An investigation of geometrical considerations. — Lulea, November, 2005. — P. 26–35.
7. Shinn, B. W. Laser stabilisation of arc cathode spots in titanium welding [Text] / B. W. Shinn, D. F. Farson, P. E. Denney // Science and Technology of Welding and Joining. — 2005. — Vol. 10, № 4. — P. 475–481. doi:10.1179/174329305x46673.
8. Лабур, Т. М. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом алюминиевых сплавов с регулируемой формой импульсов [Текст] / Т. М. Лабур, А. М. Жерносеков, М. Р. Яворская, М. П. Пашуля // Сварочное производство. — 2013. — № 11. — С. 3–7.
9. El Rayes, M. The influence of various hybrid welding parameters on bead geometry [Text] / M. El Rayes, C. Walz, G. Sepold // Welding Journal. — 2004. — Vol. 83, Issue 5. — P. 147–153.
10. Хаскин, В. Ю. Особенности сварки тонколистовых низкоуглеродистых сталей импульсно-периодическим излучением СО₂-лазера [Текст] / В. Ю. Хаскин, С. Ю. Павловский, В. П. Гаращук и др. // Автоматическая сварка. — 2001. — № 2. — С. 42–45.

Abstract. The urgency of this work is associated with lowering of thermal impact on base metal during welding that promotes minimizing residual thermal deformations of items being welded, for instance, railway car or ship hull. This, in its turn, simplifies or completely eliminates the complex operation of finish straightening. However, one of the welding technologies reducing the magnitude of deformations, compared to currently applied arc welding, is laser welding. Its application, however, is limited by high requirements to edge preparation. In order to lower these requirements, it is rational to use hybrid laser-arc welding with application of consumable-electrode arc. Here, lowering of arc pressure on the weld pool and heat input into the metal being welded can be achieved due to pulse modulation of arc and laser components of the hybrid process. The work shows that it is rational to apply simultaneous pulse modulation of the welding arc and laser radiation with the frequency close to that of natural vibrations of the weld pool in laser welding, in order to improve formation of weld upper bead and increase the penetration depth. Modulation frequencies can be equal to or multiple of each other, exceeding the values of arc pulse feed frequencies.

Keywords: steels, laser, arc, welding, electrode, pulse, frequency, energy, current, penetration.