

ГИБРИДНАЯ ЛАЗЕРНО-МИКРОПЛАЗМЕННАЯ СВАРКА НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ*

И.В. Кривцун¹, В.Н. Коржик^{1,2}, В.Ю. Хаскин^{1,2}, З. Ло², Е.В. Илляшенко¹

¹ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Гуандунский институт сварки (Китайско-украинский институт сварки им. Е.О. Патона).
510650, г. Гуанчжоу, Тяньхэ, ул. Чансин, 363. E-mail: wuby@gwi.gd.cn

Одним из современных инновационных способов сварки тонколистовых нержавеющей сталей, позволяющих минимизировать остаточные деформации, получать высококачественные и долговечные соединения, является гибридная лазерно-микроплазменная сварка. В данной работе отработаны базовые технологические приемы гибридной лазерно-микроплазменной сварки, уточнены параметры режимов, а также оценены механические свойства и коррозионная стойкость получаемых соединений стали SUS304. Экспериментально подтверждена перспективность применения лазерно-микроплазменной сварки для соединения нержавеющей сталей малых толщин. Библиогр. 6, табл. 2, рис. 10.

Ключевые слова: лазерно-микроплазменная сварка, нержавеющая сталь SUS304, присадочная проволока, погонная энергия, прочность, удлинение, коррозионная стойкость, гибридный эффект

Сварные изделия из тонколистовых нержавеющей сталей изготавливаются современной промышленностью с целью применения их в областях техники, связанных с необходимостью эксплуатации достаточно прочных конструкций, подверженных коррозии и определенным механическим воздействиям. Примерами таких задач могут быть: изготовление конструкций бытового назначения для условий морского климата или повышенной влажности, элементов корпусных конструкций транспортной техники (например, корпусов железнодорожных вагонов), сильфонных компенсаторов для атомной энергетики, оборудования химической и пищевой промышленности (например, баков, фильтров) и прочее. При этом часто ставятся задачи сварки нержавеющей сталей толщиной до 3,0 мм встык. Как правило, для решения таких задач используют контактную [1] или аргонодуговую сварку [2], реже – плазменную [3].

Однако данные способы сварки далеко не всегда позволяют максимально приблизить механические характеристики получаемых соединений к характеристикам основного металла, а также часто не удовлетворяют требованиям минимизации остаточных сварочных деформаций тонколистовых сталей. Одним из лучших на сегодняшний день способов сварки с позиций минимизации остаточных деформаций, получения высококачественных и долговечных соединений является лазерная сварка [4]. Однако из-за сравнительно высокой стоимости лазерного оборудования этот способ на сегодняшний день не

получил широкого распространения. Одним из путей снижения стоимости лазерного оборудования является уменьшение мощности излучения за счет частичной ее замены плазменно-дуговой составляющей в сварочном процессе. Такой процесс называется гибридной лазерно-плазменной сваркой [5]. Если при этом сохранить качество сварных соединений близким к качеству лазерной сварки, возможно получение новой перспективной сварочной технологии. Поэтому данная работа посвящена исследованию возможностей гибридной лазерно-микроплазменной сварки тонколистовых нержавеющей сталей на примере стали SUS304 толщиной $\delta = 0,3 \dots 3,0$ мм.

Целью данной работы является отработка базовых технологических приемов гибридной лазерно-микроплазменной сварки тонколистовых нержавеющей сталей на примере стали SUS304, выбор параметров режимов для таких приемов, а также проверка механических и коррозионных свойств получаемых соединений.

Технологические исследования процесса гибридной лазерно-микроплазменной сварки нержавеющей стали SUS304 (аналог 08X18H10) проводились согласно схеме, приведенной на рис. 1. В ходе экспериментов применяли дисковый лазер с длиной волны излучения $\lambda = 1,03$ мкм, мощность которого изменяли в пределах 0,3...1,2 кВт. Диаметр фокального пятна составлял порядка 0,4 мм. В примененном для исследований интегрированном коаксиальном плазматроне прямого действия оригинальной разработки лазерное излучение со-

*По материалам доклада, представленного на международной конференции «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов», 9–13 сентября 2019 г., г. Одесса.

Кривцун И.В. – <http://orcid.org/0000-0001-9818-3383>

© И.В. Кривцун, В.Н. Коржик, В.Ю. Хаскин, З. Ло, Е.В. Илляшенко, 2019

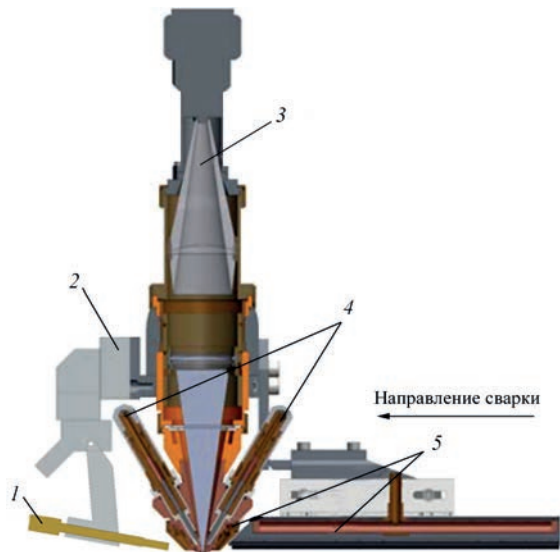


Рис. 1. Схема интегрированного плазмотрона и проведения экспериментов: 1 – подача присадочной проволоки; 2 – крепление на руке робота; 3 – подача лазерного излучения мощностью 0,3...1,2 кВт; 4 – катодные узлы; 5 – газовая защита

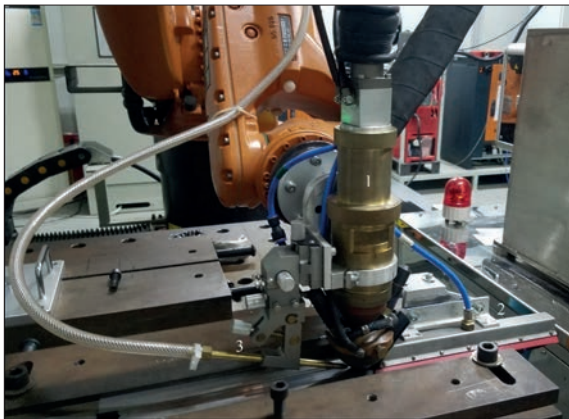


Рис. 2. Внешний вид головки для лазерно-микроплазменной сварки в руке робота KUKA KR30HA: 1 – интегрированный плазмотрон; 2 – система защиты формируемого шва; 3 – мундштук для подачи присадочной проволоки

вмещали со сжатой малоамперной дугой мощностью до 2,3 кВт [6]. В нем сфокусированное лазерное излучение и сжатая дуга выводились совместно через общее сопло диаметром 2,5 мм на свариваемый образец, расположенный на расстоянии порядка 3 мм от среза сопла. Фокальную плоскость лазерного излучения располагали на глубине порядка 0,5 мм относительно поверхности образца. Имелась возможность подачи присадочной проволоки со скоростью 60...600 м/ч. В экспериментах применяли электрическую дугу непрерывного действия прямой полярности. Сила тока дуги интегрированного микроплазматрона плавно регулировалась до 80 А при напряжении на дуге до 28 В. В качестве образцов для сварки встык и выполнения проплавов использовали листы стали SUS304 размером (200...300)×100×δ мм, где δ = 0,3; 0,5; 1,0; 1,5; 3,0 мм. В качестве присадки использовали проволоку ESAB OK Autrod 308L (диаметром 0,8 мм), которую подавали со скоростью 60 м/ч. Интегрированный плазмотрон перемещали относительно свариваемого образца при помощи антропоморфного робота KUKA KR30HA (рис. 2).

Проведенные эксперименты показали высокую стабильность процесса лазерно-микроплазменной сварки. Так, в случае гибридной сварки встык листов стали SUS304 (δ = 3,0 мм) с присадочной проволокой были получены положительные результаты как с зазором 0,5 мм между свариваемыми кромками, так и без зазора. Положительные результаты по критерию формирования верхнего и обратного валика шва были получены в широком диапазоне сварочных скоростей – от 30 до 50 м/ч. При этом приемлемые результаты сварки без зазора между кромками наблюдались в диапазоне скоростей 30...40 м/ч, а с зазором – 40...50 м/ч (рис. 3, 4).

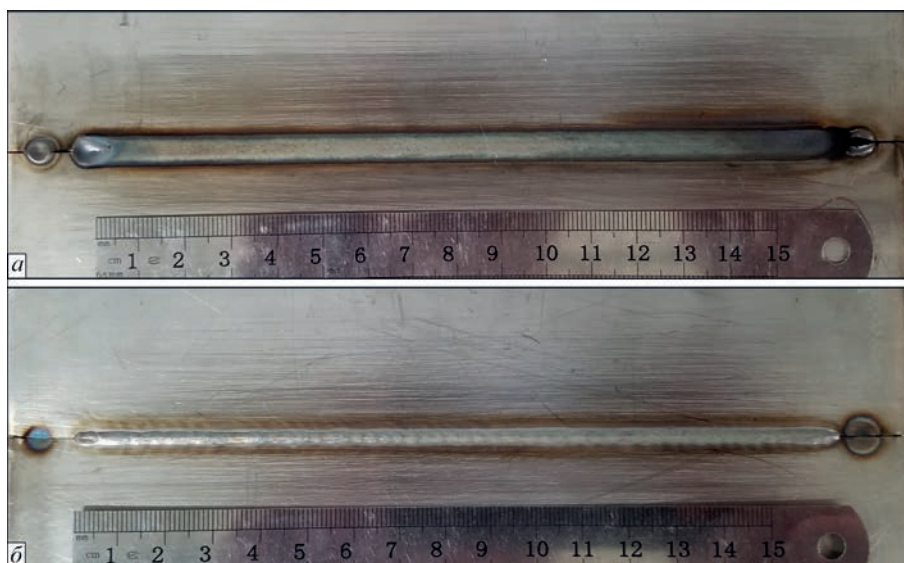


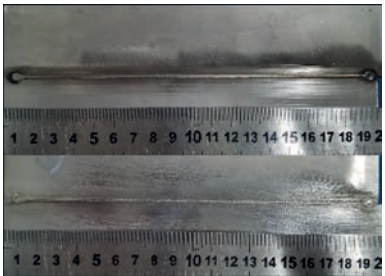
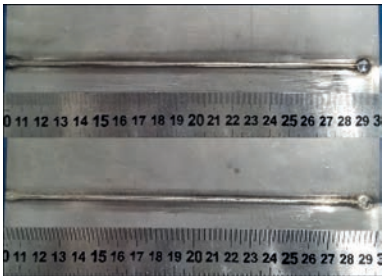
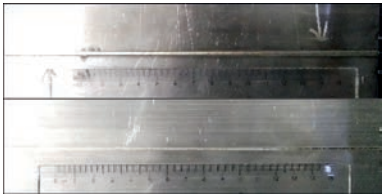



Рис. 3. Внешний вид пластин стали SUS304 (δ = 3,0 мм), сваренных встык с зазором 0,5 мм между кромками лазерно-микроплазменным способом (мощность излучения $P = 1,2$ кВт, сварочный ток $I = 80$ А, напряжение $U = 28$ В, скорость сварки $v = 30$ м/ч): лицевая (а) и обратная (б) стороны

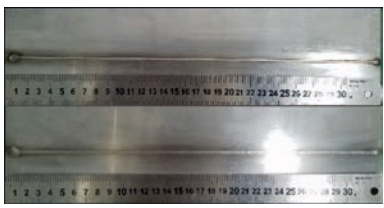
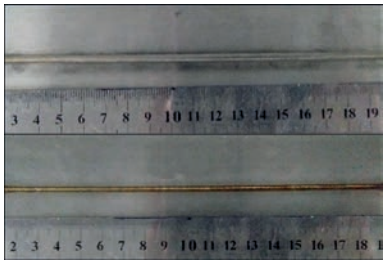
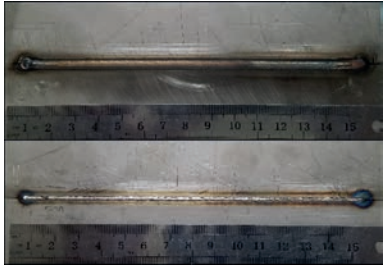

В результате проведения ряда экспериментов были определены параметры режимов гибридной сварки встык листов стали SUS304 как без применения присадочной проволоки (табл. 1), так и с ее применением (табл. 2). Согласно этим параметрам были сварены соединения, из которых затем были изготовлены образцы типа XIII (XIIIa) (ГОСТ 6996-66) для выполнения механических испытаний и об-

разцы произвольной формы для исследований коррозионной стойкости по весовой методике. Кроме того, при исследовании процесса лазерно-микроплазменной сварки стали SUS304 без применения присадочной проволоки были найдены такие параметры режима, которые позволяют выполнять качественные соединения без подрезов и провисаний шва во всем диапазоне рассмотренных толщин.

Таблица 1. Режимы и результаты гибридной лазерно-микроплазменной сварки тонколистовой стали SUS304 без применения присадочной проволоки

δ, мм	Мощность излучения, Вт	Сварочный ток, А	Напряжение на дуге, В	Скорость сварки, м/ч	Результат (вид шва сверху и снизу)
0,3	300	15	22	400	
0,5	1000	50	26	360	
1,0	1000	50	26	180	
1,0	1000	70	27	180	
1,5	1200	50	26	120	
3,0	1200	80	28	48	

Таблиця 2. Режимы и результаты гибридной лазерно-микроплазменной сварки тонколистовой стали SUS304 с применением присадочной проволоки (диаметром 0,8 мм), подаваемой со скоростью 60 м/ч

δ , мм	Мощность излучения, Вт	Сварочный ток, А	Напряжение на дуге, В	Скорость сварки, м/ч	Результат (вид шва сверху и снизу)
1,0	1000	70	27	120	
1,5	1200	50	26	90	
3,0	1200	80	28	42	
3,0	1200	80	28	30	

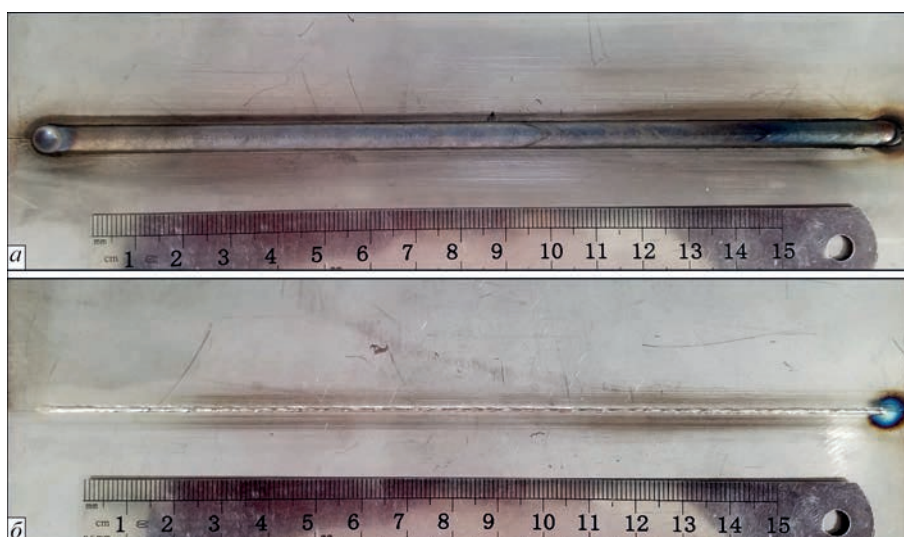


Рис. 4. Внешний вид пластин стали SUS304 ($\delta = 3,0$ мм), сваренных встык без зазора между кромками лазерно-микроплазменным способом (мощность излучения $P = 1,2$ кВт, сварочный ток $I = 80$ А, напряжение $U = 28$ В, скорость сварки $v = 40$ м/ч): лицевая (а) и обратная (б) стороны



Рис. 5. Сваренный образец SUS304 ($\delta=1,5$ мм): лицевая (а, б) и обратная (в) стороны

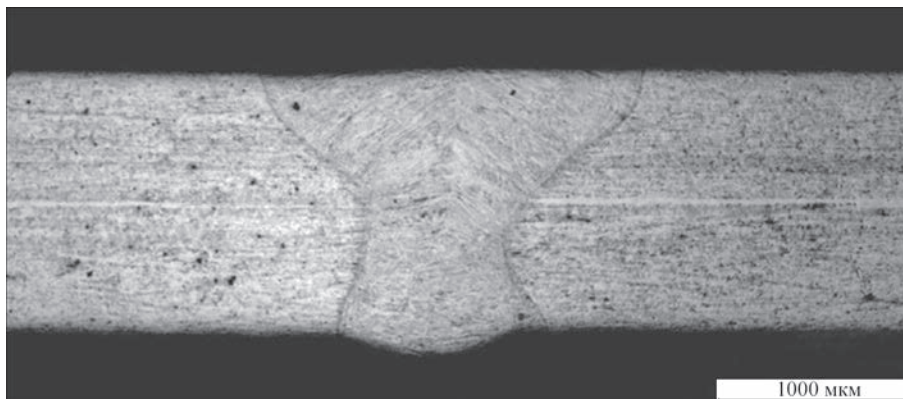


Рис. 6. Макроструктура стыкового соединения стали SUS304 ($\delta = 1,5$ мм), полученного лазерно-микроплазменной сваркой без применения присадочной проволоки

Один из примеров – результат сварки стали SUS304 толщиной $\delta = 1,5$ мм – приведен ниже и на рис. 5, 6.

Режим и результат гибридной лазерно-микроплазменной сварки бездефектного соединения из стали SUS304 ($\delta = 1,5$ мм) без применения присадки

Мощность лазера P , Вт.....	1200
Ток дуги I , А	50
Расход плазмообразующего газа $Q_{пл.}$, л/мин.....	10
Расход защитного газа $Q_{зщ.}$, л/мин	10
Скорость сварки v , м/мин.....	2
Зазор от детали до сопла, мм	3
Расход дополнительного защитного газа	
$Q_{доп.зщ.}$, л/мин	20
Расход газа защиты корня шва $Q_{обр.}$, л/мин.....	20
Ширина лицевой (верхней) стороны шва, мм.....	2,1
Выпуклость лицевой стороны, мм	0,2
Ширина обратной стороны шва (корня), мм	1,0
Выпуклость обратной стороны шва (корня), мм	0,25

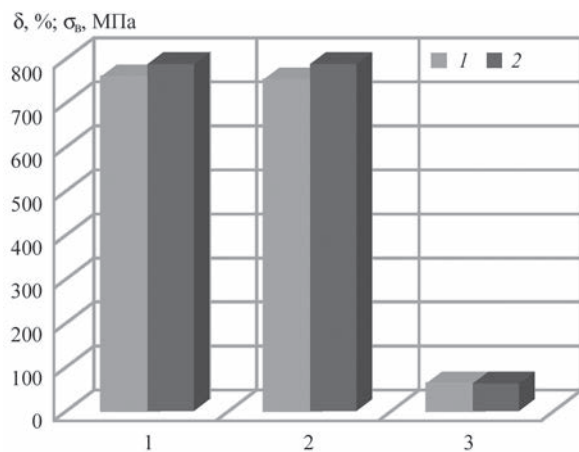


Рис. 7. Сравнительные результаты механических испытаний сваренных лазерно-микроплазменным способом образцов из стали SUS304 (1) и основного металла (2) при их статическом растяжении: 1 – усредненный предел прочности σ_B (МПа) для образцов толщиной 1 и 3 мм; 2 – усредненный предел прочности σ_B (МПа) для образцов толщиной 1,5 мм; 3 – относительное удлинение δ (%) для всех случаев

Для получения результатов сравнительных механических испытаний основного металла и соединения из стали SUS304 ($\delta = 1,5$ мм), сваренного встык лазерно-микроплазменным способом без присадки, были вырезаны две серии по три образца. Еще одна серия из четырех образцов была вырезана из сваренных гибридным способом стыков той же стали толщиной $\delta = 1$ и 3 мм (по два образца каждого типа). При помощи разрывной машины типа MTS Criterion 45 проводились испытания на статическое растяжение стыковых швов для определения предела прочности σ_B (МПа) и относительного удлинение δ (%). Измеренные для каждой серии образцов результаты усреднялись. По полученным усредненным значениям построили соответствующие диаграммы (рис. 7). В результате было установлено, что прочность гибридной лазерно-микроплазменной сварки нержавеющей стали SUS304 – около 96 % прочности основного металла, относительное удлинение сваренных таким способом образцов – 100 % основного металла. Для большинства сварочных задач приведенные показатели являются удовлетворительными.

Испытания коррозионной стойкости стыковых соединений из стали SUS304 ($\delta = 1,0; 1,5$ и 3,0 мм), полученных лазерно-микроплазменной сваркой без присадочной проволоки, выполняли по весовой методике. Согласно этой методе из сваренных образцов вырезали темплеты (по три образца для каждого случая), близкие по ширине к ширине швов из ЗТВ. Размеры темплетов составляли $(5...10) \times (3...8) \times \delta$ мм. Таким образом, темплет содержал определенную часть сварного шва и ЗТВ при минимальной части основного металла. Отдельно вырезали темплеты близких размеров из основного металла (контрольные образцы). Готовые темплеты взвешивали на аналитических весах с точностью до 0,001 г, после чего погружали в так называемую царскую водку – смесь кислот $HNO_3 + 2HCl$. Через определенное время (как пра-

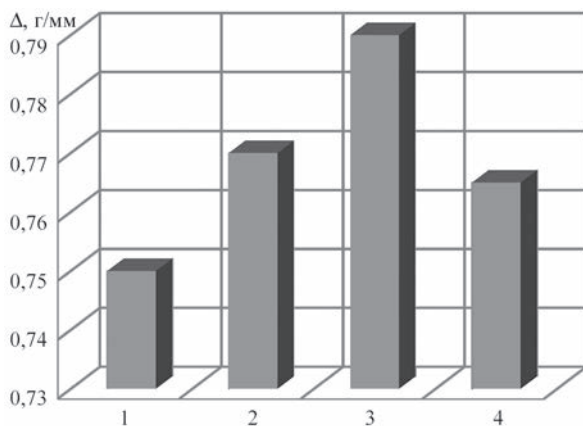


Рис. 8. Усредненные величины потерь массы образцов из стали SUS304 (Δ): 1 – $\delta = 1,0$ мм; 2 – $\delta = 1,5$ мм; 3 – $\delta = 3,0$ мм; 4 – основной металл

вило, 1...2 ч) образцы доставали, тщательно промывали, высушивали и взвешивали еще раз. Величина потери веса позволяет судить о скорости коррозии. Сравнение потери веса контрольного образца из основного металла с потерей веса сваренного образца позволяет определить коррозионную стойкость последнего.

Результаты испытаний на коррозионную стойкость вырезанных образцов отражены в виде диаграмм на рис. 8. По этим результатам можно сделать заключение о том, что все полученные данные находятся в пределах ошибки эксперимента, а отклонение величин потери массы сварных соединений от основного металла находится в пределах 3...4 %. Потеря массы образцов лежит в пределах 0,7...0,8 г/ч. Скорость коррозии при этом составляет $(6...7) \cdot 10^{-3}$ г/мин. Наблюдаемая тенденция роста потери массы образцов с ростом их толщины может объясняться ростом размера зерен и увеличением ЗТВ, вызванным ростом погонной энергии сварки.

В ходе анализа проведенных технологических исследований определили погонную энергию процесса (E , Дж/мм) как сумму мощностей лазерной (P , Вт) и микроплазменной (IU , Вт) составляющих, отнесенную к скорости сварки (v , мм/с). По результатам вычислений построили зависимость изменения погонной энергии двух рассмотренных процессов лазерно-микроплазменной сварки – с присадочной проволокой и без нее (рис. 9). Сравнение кривых 1 и 2, приведенных на рис. 9, показало, что для применения присадочной проволоки погонную энергию процесса необходимо увеличить на 20...40 % в случае сварки с плотно состыкованными кромками и на 15...30 % в случае сварки с зазором между кромками. Желательно, чтобы величина такого зазора составляла порядка 15...20 % толщины стыкуемых кромок.

Для сравнения результатов лазерной, микроплазменной и гибридной лазерно-микроплазменной сварки был проведен следующий эксперимент.

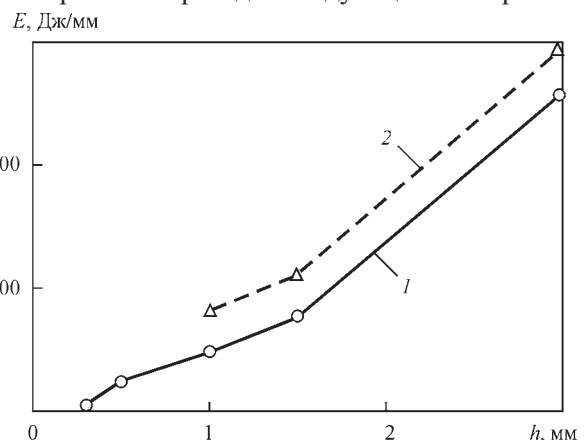


Рис. 9. Зависимости погонной энергии E (Дж/мм) лазерно-микроплазменной сварки без проволоки (1) и с проволокой (2) от толщины h (мм) свариваемой стали SUS304

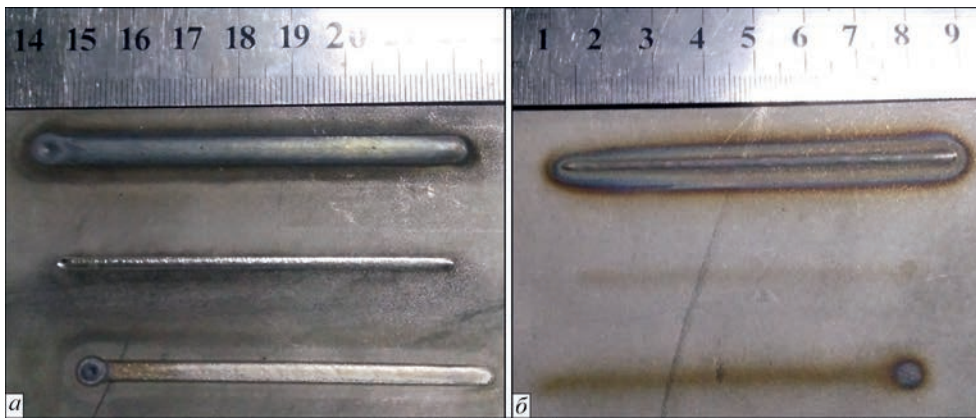


Рис. 10. Внешний вид лицевой (а) и обратной (б) сторон проваров в пластине из стали SUS304 толщиной $\delta = 3,0$ мм (сверху вниз): гибридный, лазерный, микроплазменный

Лазерно-микроплазменным способом без применения присадки был получен гарантированный провар в пластине из стали SUS304 ($\delta = 3,0$ мм) на режиме: $P = 1200$ Вт, $I = 80$ А, $U = 28$ В, $v = 45$ м/ч. Затем на той же скорости и с теми же прочими параметрами режима были выполнены два провара – лазерным и микроплазменным способами (рис. 10). При этом сумма погонных энергий составляющих процессов соответствовала погонной энергии гибридной сварки.

Исследование поперечных сечений этих проваров показало, что глубина гибридного провара, примерно на 25 % превосходит сумму глубин лазерного и микроплазменного проваров. Это позволило сделать заключение о наличии явно выраженного гибридного эффекта в случае лазерно-микроплазменной сварки рассмотренным способом.

Выводы:

1. В ходе данной работы исследовали гибридную лазерно-микроплазменную сварку тонколистовых нержавеющей сталей на примере стали SUS304 без присадочной проволоки и с ее применением. Определили, что применение присадочной проволоки целесообразно, начиная с толщин не менее 1,0 мм. При этом для полного переплава проволоки диаметром 0,8 мм в случае сварки с плотно состыкованными кромками погонную энергию процесса необходимо увеличить на 20...40 %, а в случае сварки с зазором между кромками – на 15...30 %. Величина зазора должна составлять порядка 15...20 % толщины стыкуемых кромок.

2. Определение механических свойств получаемых гибридной лазерно-микроплазменной сваркой соединений из нержавеющей стали SUS304 показало, что их прочность на статический разрыв составляет около 96 % прочности основного металла, а относительное удлинение аналогично данному параметру основного металла. Для боль-

шинства сварочных задач приведенные показатели являются удовлетворительными.

3. Испытания на коррозионную стойкость показали, что отклонение величин потери массы сварных соединений относительно основного металла находится в пределах 3...4 %. Потеря массы образцов лежит в пределах 0,7...0,8 г/ч. Скорость коррозии при этом составляет $(6...7) \cdot 10^{-3}$ г/мин. Величина потерь массы образцов увеличивается с ростом их толщины, что может объясняться ростом размера зерен и увеличением ЗТВ, вызванными повышением погонной энергии сварки.

4. Сравнительные исследования проваров, выполненных в стали SUS304 лазерным, микроплазменным и гибридным способами показали, что глубина гибридного провара примерно на 25 % превосходит сумму глубин лазерного и микроплазменного проваров. При этом сумма погонных энергий составляющих процессов соответствовала погонной энергии гибридной сварки. Это свидетельствует о наличии гибридного эффекта в случае лазерно-микроплазменной сварки.

Работа выполнялась в рамках проекта №2018GDASCX-0803 «Research and development of laser and plasma technologies for hybrid welding and cutting (Научно-исследовательские разработки лазерных и плазменных технологий гибридной сварки и резки)», Guangzhou, China, а также в рамках специального проекта № 2017GDASCX-0411 «Capacity – Building of Innovation – Driven Development for Special Fund Projects» Программ Академии наук провинции Гуандун (КНР) «Исследование физико-химических процессов при взаимодействии паровой плазмы с поверхностью металлов и разработка научных основ технологии водо-воздушной плазменной резки листовых сталей для получения сварных соединений».

Список літератури

1. Банов М.Д. (2008) *Технология и оборудование контактной сварки*: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования. 3-е изд. Москва, Издательский центр «Академия».
2. Петров В.Н. (1969) *Сварка и резка нержавеющей стали*. Ленинград, Судостроение.
3. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. (2008) *Плазменные технологии. Сварка, нанесение покрытий, упрочнение*. Москва, Машиностроение.
4. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. (1988) *Лазерная техника и технология*. В 7 кн. Кн. 5. Лазерная сварка металлов. Учеб. пособие для вузов. Григорьянц А.Г. (ред.). Москва, Высшая школа.
5. Кривцун И.В., Шелягин В.Д., Хаскин В.Ю. и др. (2007) Гибридная лазерно-плазменная сварка алюминиевых сплавов. *Автоматическая сварка*, **5**, 49–53.
6. Кривцун И.В., Коржик В.Н., Хаскин В.Ю. и др. (2017) Установка нового поколения для лазерно-микроплазменной сварки. *Лучевые технологии в сварке и обработке материалов*. Сб. докл. Восьмой между. конф. Кривцун И.В. (ред.). Киев, Международная Ассоциация «Сварка», сс. 95–100.

References

1. Banov, M.D. (2008) *Technology and equipment for resistance welding*: Manual for students of schools of vocat. educ. 3rd ed. Moscow, Akademiya [in Russian].
2. Petrov, V.N. (1969) *Welding and cutting of stainless steels*. Leningrad, Sudostroenie [in Russian].
3. Sosnin, N.A., Ermakov, S.A., Topolyansky, P.A. (2008) *Plasma technologies. Welding, coating, strengthening*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
4. Grigoryants, A.G., Shiganov, I.N. (1988) *Laser engineering and technology*. In: 7 books. Book 5: Laser welding of metals: Manual for higher educ. instit. Ed. by A.G. Grigoryants. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
5. Krivtsun, I.V., Shelyagin, V.D., Khaskin, V.Yu. et al. (2007) Hybrid laser-plasma welding of aluminium alloys. *The Paton Welding J.*, **5**, 36-40.
6. Krivtsun, I.V., Korzhik, V.N., Khaskin, V.Yu. et al. (2017) Unit of new generation for laser-microplasma welding. In: *Proc. of 8th Int. Conf. on Beam Technologies in Welding and Materials Processing*. Ed. by I.V. Krivtsun. Kiev, IAW, 95-100.

ГІБРИДНЕ ЛАЗЕРНО-МІКРОПЛАЗМОВЕ ЗВАРЮВАННЯ НЕРЖАВІЮЧИХ СТАЛЕЙ

І.В. Кривцун¹, В.М. Коржик^{1,2}, В.Ю. Хаскін^{1,2}, З. Ло², Є.В. Ілляшенко¹

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Гуандунський інститут зварювання (Китайсько-український інститут зварювання ім. Є.О. Патона).

510650, м. Гуанчжоу, Тяньхе, вул. Чансин, 363. E-mail: wuby@gwi.gd.cn

Одним із сучасних інноваційних способів зварювання тонколистових нержавіючих сталей, що дозволяють мінімізувати залишкові деформації, отримувати високоякісні та довговічні з'єднання, є гібридне лазерно-микроплазмове зварювання. У даній роботі відпрацьовані базові технологічні прийоми гібридного лазерно-микроплазмового зварювання, уточнені параметри режимів, а також оцінені механічні властивості та корозійна стійкість одержуваних сполук сталі SUS304. Експериментально підтверджена перспективність застосування лазерно-микроплазменного зварювання для з'єднання нержавіючих сталей малої товщини. Бібліогр. 6, табл. 2, рис. 10.

Ключові слова: лазерно-микроплазмове зварювання, нержавіюча сталь SUS304, присадний дріт, погонна енергія, міцність, подовження, корозійна стійкість, гібридний ефект

HYBRID LASER-MICROPLASMA WELDING OF STAINLESS STEELS

I.V. Krivtsun¹, V.N. Korzhik^{1,2}, V.Yu. Khaskin^{1,2}, Z. Lo², E.V. Ilyashenko¹

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²Guangdong Institute of Welding (China-Ukraine E.O.Paton Institute of Welding).

363 Chiansin Str., 510650, Guangzhou, Tianhe. E-mail: wuby@gwi.gd.cn

Hybrid laser-microplasma welding is one of the modern innovative processes of welding sheet stainless steels, allowing minimization of residual deformations, producing high-quality and durable joints. In this study, basic techniques of hybrid laser-microplasma welding were optimized, mode parameters were precised, and mechanical properties and corrosion resistance of the produced joints of SUS 304 steel were assessed. The good prospects for application of laser-microplasma welding for joining thin stainless steels were confirmed experimentally. 6 Ref., 2 Tab., 10 Fig..

Keywords: laser-microplasma welding, stainless steel SUS 304, filler wire, heat input, strength, elongation, corrosion resistance, hybrid effect

Поступила в редакцію 21.10.2019

Щорічна конференція-виставка
«**НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ-2020**»

Травень 2020 р., Київ, «Асоціація «ОКО»

<http://www.ndt.com.ua>

Міжнародна конференція

«**ТИТАН 2020: ВИРОБНИЦТВО ТА ЗАСТОСУВАННЯ**»

1–3 червня 2020 р., Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

тел.: 38044 200-82-77, journal@paton.kiev.ua, <http://pwi-scientists.com/rus/titan2020>