

ОСОБЕННОСТИ ГИБРИДНОЙ ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ*

Турък Э., Банасик М., Стано С., Урбаньчык М.

Исследовательская сеть Лукасевич — Институт сварки, г. Гливице, Польша.
44100, г. Гливице, ул. Бл. Чеслава 16-18, Польша

Применение гибридной лазерно-дуговой сварки лазер + MAG для соединения элементов крупных конструкций из нержавеющей стали является относительно новой проблемой. В работе обсуждены вопросы технологии гибридной сварки аустенитной стали X2CrNi18-9 и аустенитно-ферритной X2CrNiMoN21-5-1 с использованием дискового лазера мощностью 12 кВт. Определены технологические условия гибридной сварки с полным проплавлением стыковых соединений стали толщиной 8, 12 и 20 мм, а также тавровых соединений со стыковым швом с частичным проплавлением. Указаны типичные дефекты сварных швов высоколегированных нержавеющей сталей, выполненных гибридной сваркой. Библиогр. 5, рис. 20.

Ключевые слова: гибридная сварка, лазер+дуга, активный газ, нержавеющие стали, параметры дуги и луча, расположение источников, типичные дефекты сварки

Гибридно лазерно-дуговая сварка является процессом интенсивно изучаемым, развиваемым и внедряемым в течение последних лет [1–5]. Применение гибридной лазерно-дуговой сварки плавящимся электродом (ГЛДСПЭ) лазер + сварка сплошной проволокой в инертном и активном газе (процесс ИСО 4063: 521 + 135) для соединения деталей крупных конструкций из нержавеющей стали является относительно новой проблемой. Способ гибридной сварки технологически сложен — необходимо выбрать параметры сварочной дуги и лазерного луча, подходящую смесь защитного газа и пространственное расположение обоих используемых источников энергии (конца электродной проволоки и пятна фокусировки луча) по отношению друг к другу и по отношению к линии стыка кромок для каждого типа соединения. В данной работе обсуждены вопросы технологии гибридной сварки лазер + MAG аустенитной стали X2CrNi18-9 и ферритно-аустенитной X2CrNiMoN21-5-1 с использованием дискового лазера мощностью 12 кВт и специальной гибридной головки.

Результаты экспериментов. Технологические испытания по подбору защитного газа при гибридной сварке стали X2CrNi18-9 с применением электродной проволоки G 19 9 L Si и стали X2CrNiMoN21-5-1 с применением электродной проволоки G 22 9 3 N L показали, что стабильность гибридного процесса, требуемую форму швов и минимальное разбрызгивание обеспечивает газовая смесь 97,5% Ar + 2,5% CO₂.

Глубина проплавления и ширина стыкового соединения были измерены для четырех значений диаметра используемого световода (200, 300, 400, 600 мкм) и двух направлений движения гибридной головки: с лазером как ведущим источником тепла

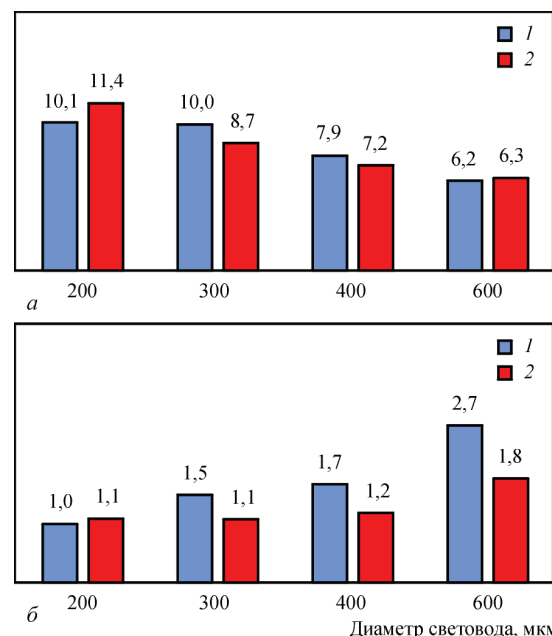


Рис. 1. Изменение глубины проплавления (а) и ширины нижней части (б) сварного шва для разных значений диаметра используемого световода и направления движения гибридной головки. Для а: 1 — глубина проплавления L — А, мм; 2 — глубина проплавления А — L, мм; для б: 1 — ширина нижней части шва L — А, мм; 2 — ширина нижней части шва А — L, мм

* Публикуется по материалам доклада, представленного на международной конференции «Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні і споріднених процесах – POLYWELD 2019», г. Киев, 23–24 мая 2019 г., НТУУ «КПИ им. Игрия Сикорского».

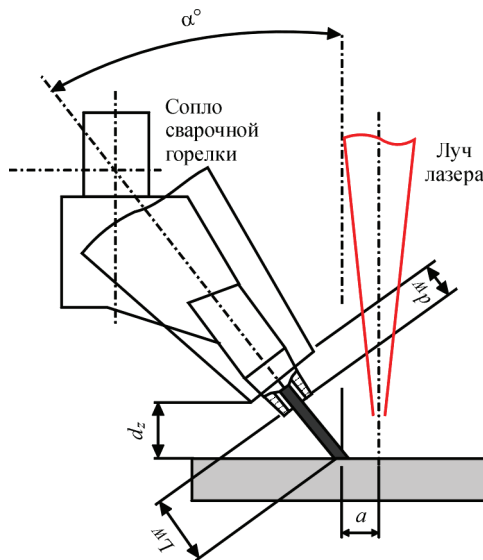


Рис. 2. Пространственное положение системы «лазерный луч – сварочная горелка MAG – свариваемый элемент», луч лазера перпендикулярный материалу: a — расстояние от конца проволоки до зоны фокусировки лазерного луча, α — угол наклона сварочной горелки MAG относительно оси лазерного луча; L_w — вылет электрода, d_z — расстояние от газового сопла до элемента, d_w — выдвижение контактного наконечника из газового сопла

(обозначение L — А) и электрической дугой как ведущим источником тепла (обозначение А — L). Замеры подтвердили, что независимо от направления сварки, глубина проплавления сопоставима для отдельных диаметров примененных световодов, а с увеличением диаметра световода уменьшается глубина проплавления и увеличивается ширина в нижней части шва (рис. 1).

С точки зрения максимизации глубины проплавления наиболее подходящим решением кажется использование световода с наименьшим диаметром. Однако из-за стабильности процесса сварки ГЛДСПЭ (стабильность газодинамического канала, сформированного в результате воздействия лазерного луча) и для обеспечения ширины сварного шва в области его нижней части на уров-

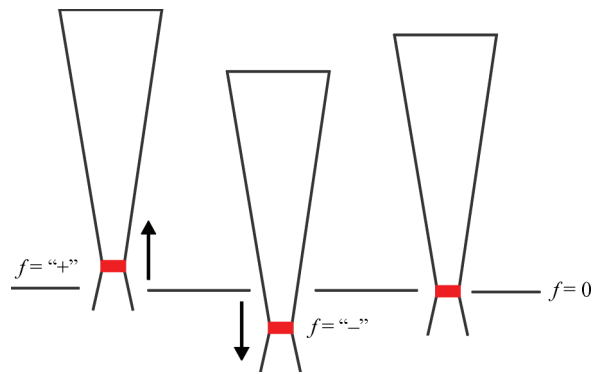


Рис. 4. Расположение фокуса лазерного луча относительно поверхности образца ($f = 0$ — положение фокуса на поверхности листа)

не свыше 1 мм рекомендуется выбирать световод с большим диаметром. В дальнейшем использовали световод диаметром 400 мкм и направление сварки А — L.

Важной группой параметров является взаимное пространственное положение системы «лазерный луч – сварочная горелка MAG – свариваемый элемент» (рис. 2).

Наиболее выгодной для автоматической сварки MIG/MAG является установка держателя перпендикулярно свариваемому материалу (угол $\alpha = 0^\circ$). В процессе гибридной сварки лазерный луч в гораздо большей степени чем сварочная дуга отвечает за полученную глубину проплавления и поэтому он устанавливается перпендикулярно свариваемому материалу.

Для технологической головки, использованной в исследовании, были выбраны угол наклона держателя горелки MAG $\alpha = 25^\circ$ и расстояние от конца проволоки до зоны фокусировки лазерного луча, обеспечивающие безопасный (без столкновений с лазерным лучом) процесс сварки: $a \leq 2$ мм. Увеличение расстояния a до около 4 мм не оказывает существенного влияния на процесс. Полученная форма сварного шва сопоставима (рис. 3, а, б). Дальнейшее увеличение рассто-

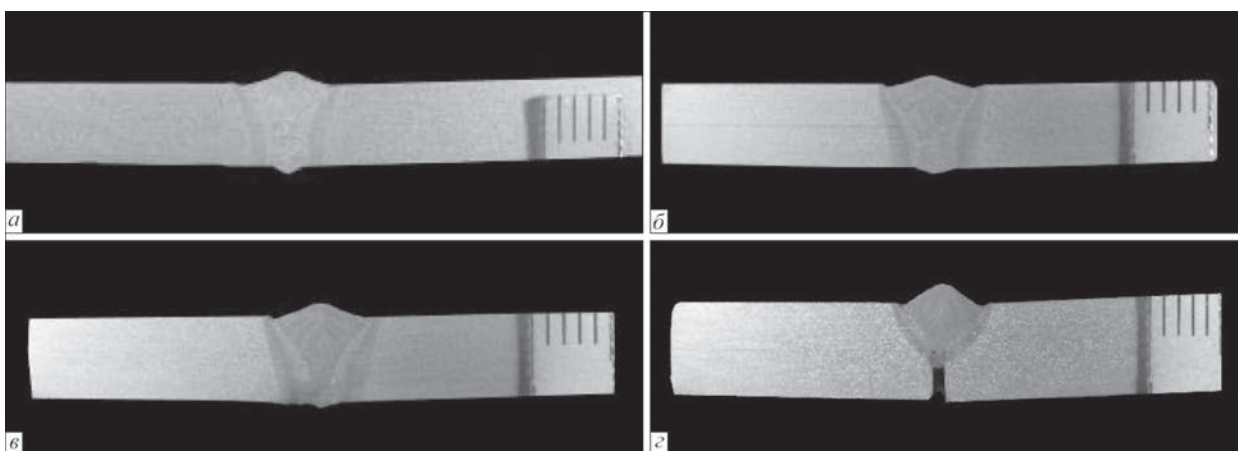


Рис. 3. Примерные макроструктуры шва, выполненного с разным расстоянием конца проволоки от зоны воздействия лазерного луча: а — $a = 2$ мм, б — 4, в — 6, г — 8

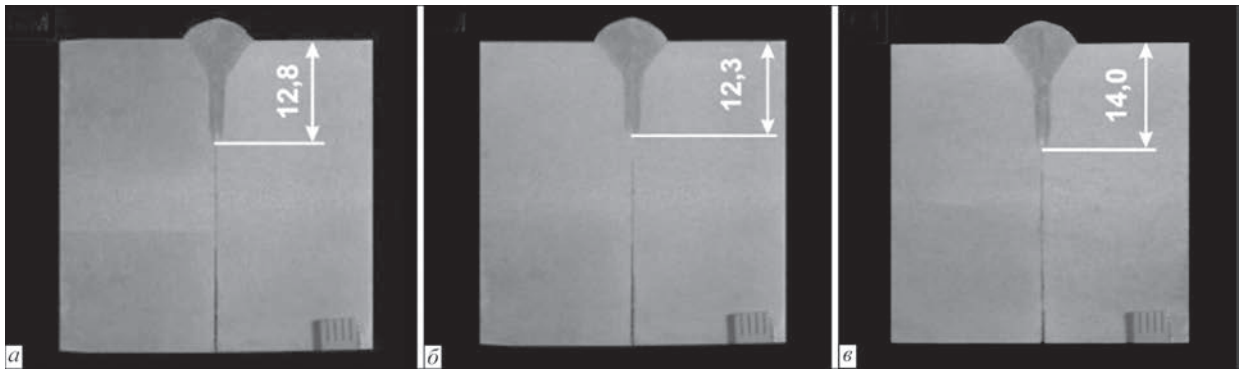


Рис. 5. Макроструктура стыковых соединений образцов толщиной 40 мм, выполненных при разном положении фокуса лазерного луча относительно поверхности свариваемого материала (мощность лазерного излучения $P_{л} = 11$ кВт, скорость сварки $v_{св} = 0,7$ м/мин, скорость подачи проволоки $v_{пн} = 11$ м/мин): а — $f = 0$ мм; б — -5 мм; в — -10 мм

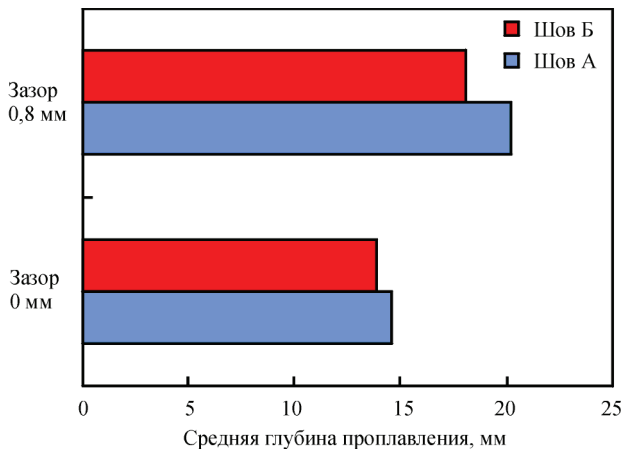


Рис. 6. Средние значения глубины проплавления стыковых соединений образцов толщиной 40 мм, выполненных с разным значением зазора g (двусторонняя сварка, первый шов — А, второй — Б)

яния вызывает уменьшение объема сварного шва (рис. 3, в) и в крайнем случае заметное падение глубины проплавления (рис. 3, з).

Отдельным вопросом является расположение фокуса лазерного луча относительно свариваемого материала (рис. 4). Технологические испытания ГЛДСПЭ проводились на образцах толщиной 40 мм с различной настройкой положения фокальной точки лазерного луча: $f = 0$; -5 и -10 мм (рис. 4).

Глубина проплавления существенно не изменялась, составляла от 12,3 до 14 мм (рис. 5). Исходя из этого, рекомендовано установить в дальней-

шем положение фокусировки лазерного луча на поверхности свариваемого материала.

Затем проведено исследование зависимости глубины проплавления и геометрических размеров сварных швов от мощности лазерного луча в процессе ГЛДСПЭ. В зависимости от мощности лазерного луча в диапазоне 6...12 кВт глубина проплавления составляла 12,5...18,5 мм. Существенное влияние на глубину проплавления оказывает также зазор соединяемых элементов, что было подтверждено испытаниями при зазоре 0 и 0,8 мм (рис. 6).

Технологические испытания сварки стыковых соединений толщиной 8, 12 и 20 мм после лазерной резки (шероховатость поверхности соответственно $\leq 11,3$; $\leq 14,2$; $\leq 70,0$ мкм) показали, что шероховатость поверхности свариваемых кромок до $R_z = 70,0$ мкм не вызывает нарушения стабильности процесса ГЛДСПЭ. В случае плазменно-дуговой резки на установке YUN-3000M, с применением смеси Ar-H₂ в качестве плазмообразующего газа, шероховатость ниже 70,0 мкм и поверхность также пригодна для сварки ГЛДСПЭ.

Характерный для плазменной резки скос кромок может вызвать осевое смещение отдельных сварных швов в двустороннем соединении. Измеряли скос кромок образцов толщиной 25 мм и длиной 600 мм после производственной плазменной резки у промышленного партнера. Результа-

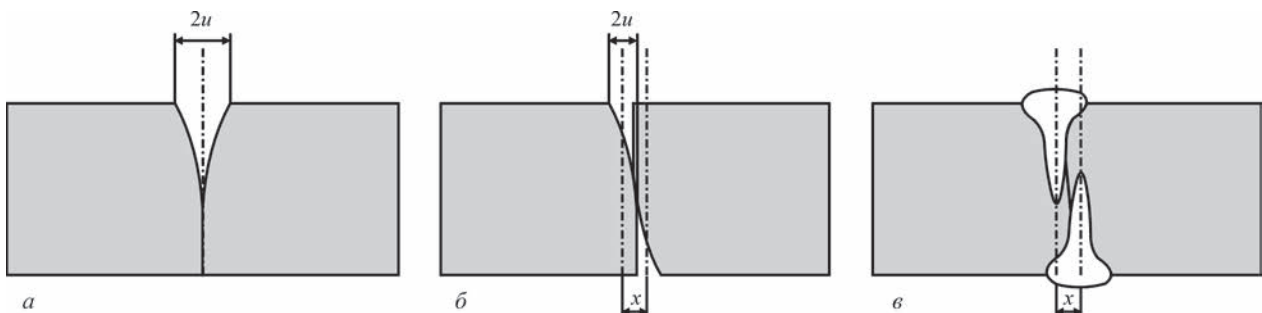


Рис. 7. Различные способы сочетания деталей, подготовленных к сварке, после плазменной резки: а — суммирование скоса на одной стороне стыка; б — смещение x оси отдельных сварных швов в двустороннем соединении; в — визуализация отсутствия проплавления, возникающего в результате сочетания деталей со скосом

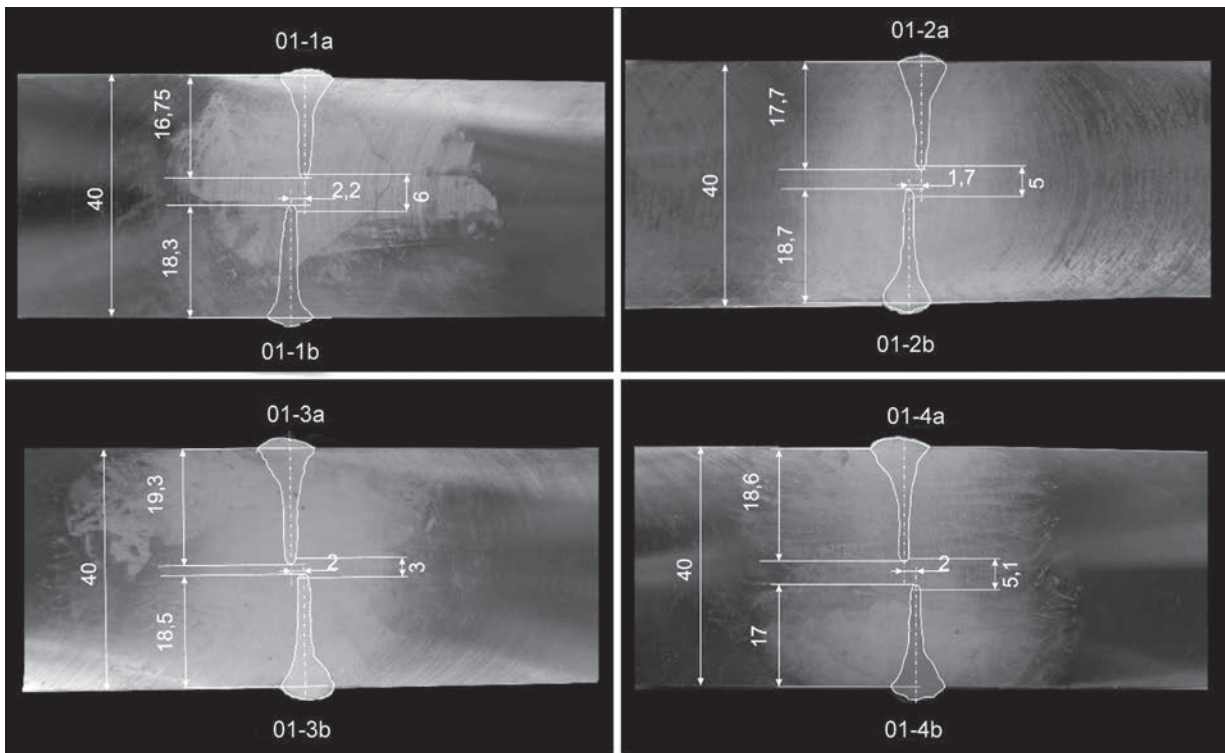


Рис. 8. Расположение и размеры швов двустороннего гибридного соединения листов толщиной 40 мм с подготовкой кромок после производственной плазменной резки и шлифовки

ты измерений показали, что скос кромок является относительно большим и при неблагоприятной комбинации листов для сварки, когда скос складывается, на поверхности листов создается зазор шириной более 2 мм. По мере увеличения толщины листа скос становится больше.

Появившийся скос приводит к тому, что комбинацию деталей в стыковом соединении можно по-

лучить двумя способами (рис. 7). В первом случае скос суммируется на одной стороне стыка деталей, вызывая увеличение зазора. Во втором случае скосы расположены на противоположных сторонах, что позволяет составить детали с меньшим зазором. Однако существует риск осевого смещения отдельных сварных швов в двухстороннем сварном шве. В этом случае возможно недостаточ-

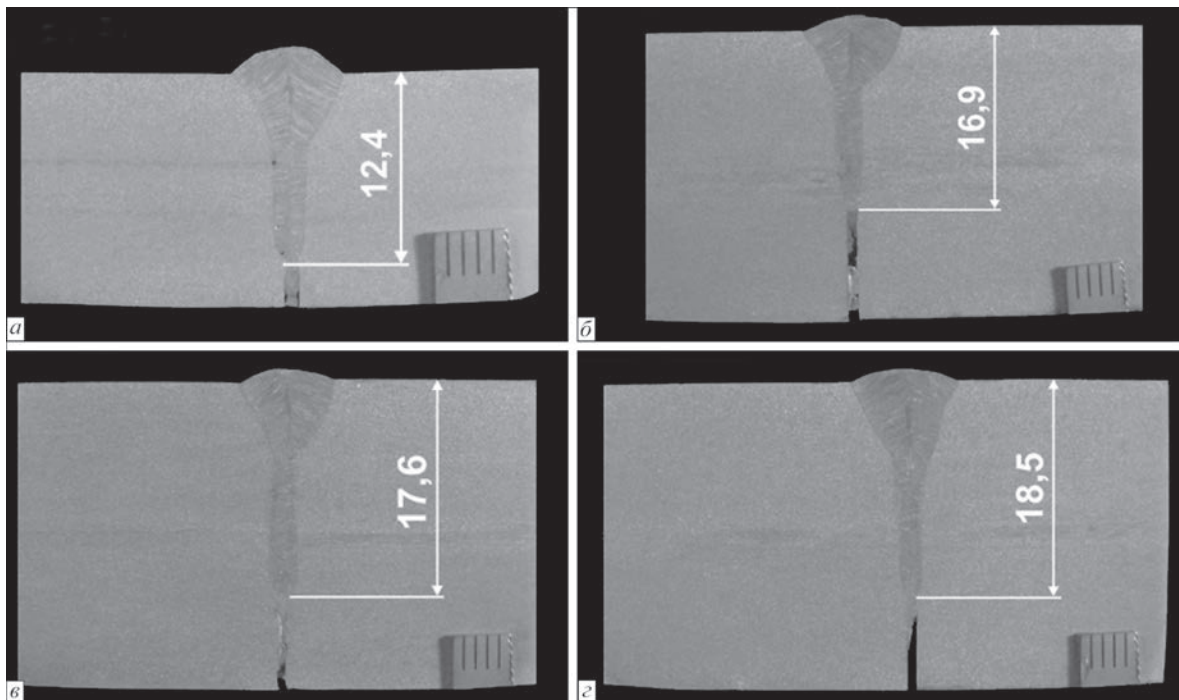


Рис. 9. Макроструктура швов, выполненных гибридной сваркой лазерным лучом мощностью 6...12 кВт: а — $P = 6$ кВт; б — 8; в — 10; г — 12

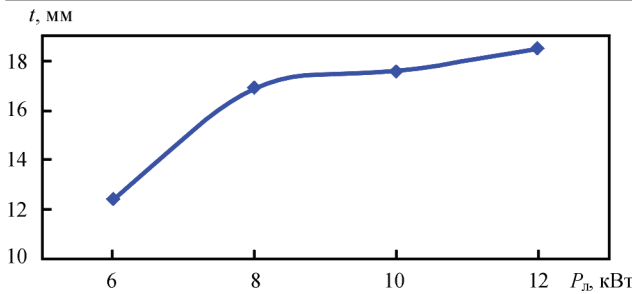


Рис. 10. Зависимость глубины проплавления t от мощности лазерного луча P_l при ГЛДСПЭ

ное проплавление в центральной части стыка, несмотря на обеспечение соответствующей глубины проплавления отдельных сварных швов (рис. 7, в).

Приведенные выше соображения подтверждают результаты ГЛДСПЭ листов толщиной 40 мм после производственной плазменной резки на образцах, предоставленных промышленным партнером. В связи с тем, что при стыковке листов в соответствии с рис. 7, а, зазор $2u$ составлял более 3 мм, была предпринята попытка составить листы для сварки в соответствии со вторым способом (рис. 7, б), чтобы получить наименьший возможный зазор. После сварки были изготовлены металлографические образцы в четырех выбранных местах по длине сварного соединения. Макрошлифы полученных соединений показаны на рис. 8.

Средняя глубина проплавления составляла около 18 мм, что не позволяло выполнить двустороннее сварное соединение толщиной 40 мм с

полным проплавлением. На металлографических шлифах наблюдалось смещение осей отдельных валиков в результате использования плазменной резки в качестве способа подготовки стыка. Из-за необходимости поддерживать соосность отдельных сварных валиков в двустороннем сварном шве, необходимо обеспечить метод подготовки кромок, который обеспечит боковую кромку, перпендикулярную поверхности листа. Для материалов толщиной до 15 мм достаточно лазерной резки. Для более толстых материалов может потребоваться механическая обработка кромок.

Для определения влияния мощности лазерного луча в процессе ГЛДСПЭ на глубину проплавления и форму швов проведено сварку листов толщиной 40 мм с поверхностью кромок после фрезерования, с зазором 0,8...1,0 мм, изменяя мощность лазерного излучения от 6 до 12 кВт (рис. 9–11).

С увеличением мощности лазерного луча глубина проплавления увеличивается, однако не по линейной зависимости. Изменение мощности лазерного луча с 6 до 8 кВт приводит к увеличению глубины проплавления примерно на 4,5 мм (рис. 10). При дальнейшем увеличении мощности на 2 кВт проплавление выше на 0,7 мм. При мощности лазерного луча 12 кВт глубина проплавления составила 18,5 мм. При увеличении мощности лазерного луча на 50 %, с 8 до 12 кВт, глубина проплавления увеличилась на 1,6 мм, т. е. только на 9 %.

На основании этих результатов определены режимы гибридной сварки лазер + MAG в нижнем

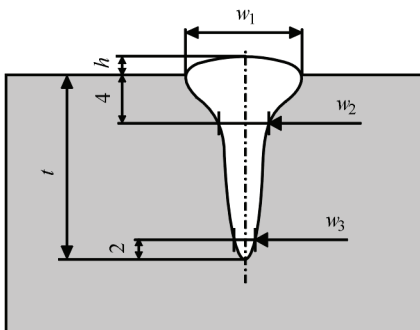
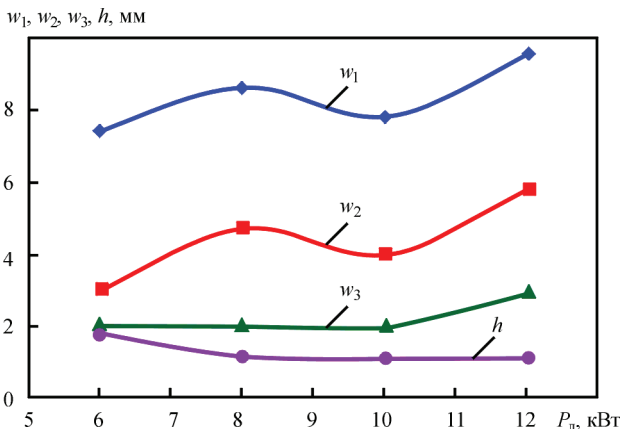


Рис. 11. Зависимость размеров шва от мощности лазерного луча при ГЛДСПЭ

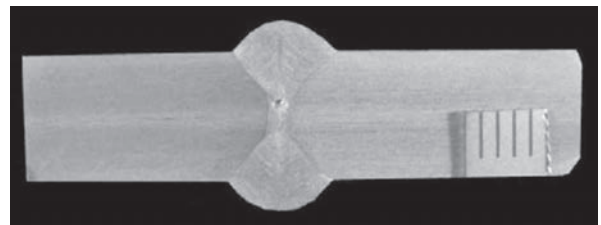


Рис. 12. Макроструктура двустороннего сварного соединения толщиной 8 мм ($P_l = 5,0$ кВт, $v_{cb} = 1,2$ м/мин, $v_{пп} = 8,4$ м/мин, ток дуги $I_d = 225$ А, напряжение дуги $U_d = 21$ В, погонная энергия сварки $Q = 3,9$ кДж/см)

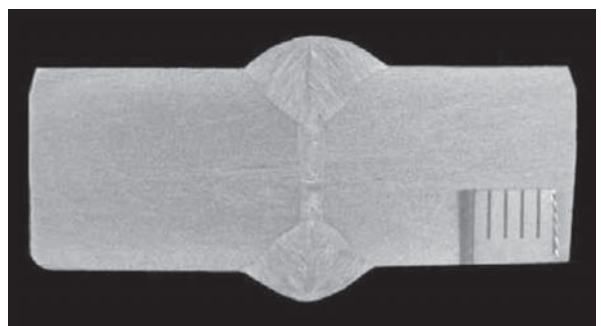


Рис. 13. Макроструктура сварного соединения толщиной 12 мм ($P_l = 5,5$ кВт, $v_{cb} = 1,2$ м/мин, $v_{пп} = 8,6$ м/мин, ток дуги $I_d = 250$ А, $U_d = 28$ В, $Q = 6,3$ кДж/см)

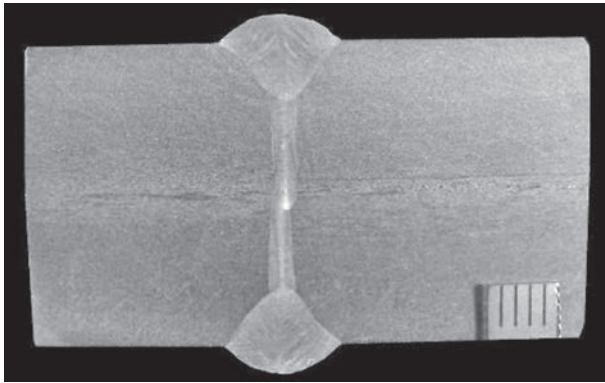


Рис. 14. Макроструктура сварного соединения толщиной 20 мм ($P_{л} = 6,5$ кВт, $v_{св} = 1,0$ м/мин, $v_{пп} = 8,5$ м/мин, $I_{д} = 235$ А, $U_{д} = 27$ В, $Q = 7,7$ кДж/см)

положении двусторонних стыковых соединений сталей X2CrNi18-9 и X2CrNiMoN21-5-1 толщиной 8, 12 и 20 мм (рис. 12–14), стыковых соединений этих листов с подваркой методом MAG и

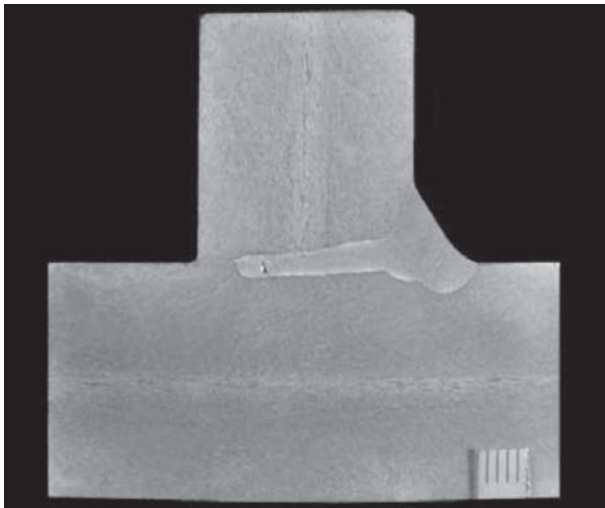


Рис. 15. Макроструктура одностороннего таврового соединения толщиной 20 мм, с частичным проплавлением ($P_{л} = 10,0$ кВт, $v_{св} = 0,7$ м/мин, $v_{пп} = 8,5$ м/мин, $I_{д} = 227$ А, $U_{д} = 29$ В, $Q = 14,2$ кДж/см)

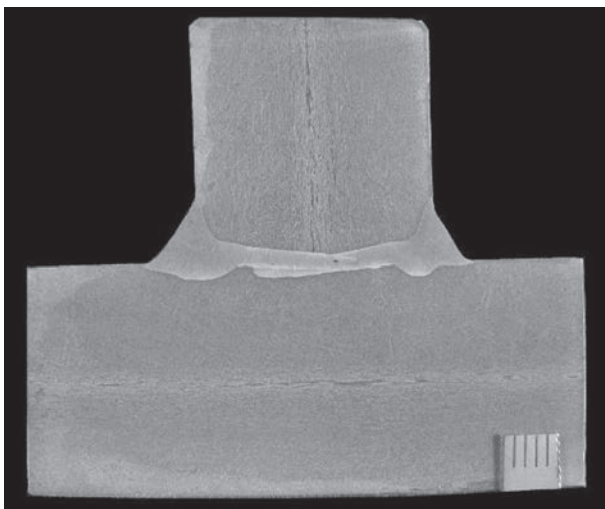


Рис. 16. Макроструктура двустороннего таврового соединения толщиной 20 мм ($P_{л} = 10,0$ кВт, $v_{св} = 1,3$ м/мин, $v_{пп} = 8,5$ м/мин, $I_{д} = 241$ А, $U_{д} = 28$ В, $Q = 7,7$ кДж/см)



Рис. 17. Обратная сторона таврового соединения листов толщиной 20 мм — выступы (хампы)

ГЛДСПЭ, а также тавровых односторонних и двусторонних соединений (рис. 15, 16).

Не разрушающие и разрушающие испытания двустороннего стыкового соединения плит из стали X2CrNi18-9 толщиной 12+12 мм (см. рис. 13) показали, что они удовлетворяют требованиям стандарта ISO 15614-14 по аттестации процедуры гибридной сварки.

Дефекты швов ГЛДСПЭ. Специфическими дефектами односторонних сварных швов, выполненных гибридной сваркой, являются нестабильное формирование обратной стороны (корня) сварных швов и пористость (рис. 17, 18).

При односторонней сварке гибридных стыковых соединений типичными дефектами являются непровар в корне сварного шва и превышение проплава. В начале имеется участок шва без полного проплавления, затем короткий участок с полным проплавлением, после которого следует про-



Рис. 18. Продольное сечение стыкового соединения толщиной 8 мм — выступы и пористость



Рис. 19. Вид одностороннего сварного соединения толщиной 20 мм ($P_{л} = 11,0$ кВт, $v_{св} = 0,4$ м/мин, $v_{пп} = 8,5$ м/мин, $I_{д} = 222$ А, $U_{д} = 31$ В, $Q = 21,5$ кДж/см): *a* — лицевая сторона — незаполненная разделка кромок и прожог после около 110 мм, *б* — корневая сторона — непровар, превышение проплава и проплавление медной трубки подвода формирующего газа

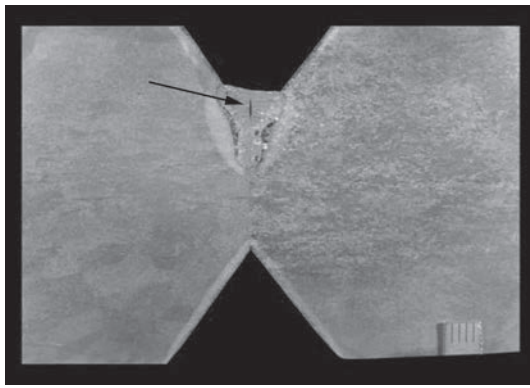


Рис. 20. Макроструктура корневого шва стыкового соединения стали X6Cr13 с трещиной (указана стрелкой)

жог и утечка жидкого металла сварочной ванны (рис. 19).

К дефектам сварных швов высоколегированных сталей, выполненных гибридной сваркой, принадлежат также горячие трещины. Склонность к образованию горячих трещин обнаружена в случае выполнения корневого шва стыкового соединения стали X6Cr13 толщиной 50 мм с притуплением 15 мм (рис. 20).

Выводы

1. Гибридная сварка лазер + МАG позволяет выполнять с полным проплавлением в нижнем положении двусторонние стыковые соединения стали X2CrNi18-9 и X2CrNiMoN21-5-1 толщиной 8, 12 мм (односторонняя) и 20 мм (двусторонняя), а

также стыковые соединения с подваркой методом МАG и ГЛДСПЭ.

2. Гибридная сварка позволяет выполнять в нижнем положении тавровые соединения листов толщиной 8, 12 и 20 мм со стыковым швом с частичным проплавлением, часто заменяющие тавровые соединения с угловым швом, а также тавровые соединения со стыковым швом листов толщиной до 20 мм.

3. К специфическим дефектам сварных швов высоколегированных нержавеющей сталей, выполненных гибридной сваркой, принадлежат: нестабильное формирование корня сварных швов, пористость и горячие трещины.

Литература/References

1. Atabaki Mazar M., Ma J., Yang G., Kovacevic R. (2014) Hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel in different butt joint configurations. *Materials and Design*, 64, December, 573–587.
2. Brian M. Victor (2011) Hybrid laser arc welding. *Edison Welding Institute, ASM Handbook, 6A, Welding Fundamentals and Processes*, 321-328
3. Krivtsov I.V., Krikent I.V., Demchenko V.F., Reisinger U., Zabirow A.F., Mokrov O.A. (2015) Interaction of CO₂-laser radiation beam with electric arc plasma in hybrid (laser + TIG) welding. *The Paton Welding Journal*, 3-4, 6-15.
4. Lembeck H. (2010) Laser hybrid welding of thick sheet metals with disk lasers in shipbuilding industry, *International Laser Technology Congress AKL*.
5. Turichin G., Velichko O., Kuznetsov A. et al. (2014) Mobile Hybrid system for pipeline welding on the base of 20 kW fiber laser. *8th International Conference on Photonic Technologies LANE*, pp. 1-4.

ОСОБЛИВОСТІ ГІБРИДНОГО ЛАЗЕРНО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ

Турик Е., Банасік М., Стано С., Урбаньчик М.

Дослідницька мережа Лукасевич — Інститут зварювання, м. Глівіце, Польща.
44100, м. Глівіце, вул. Бл. Чеслава 16-18, Польща

Застосування гібридного лазерно-дугового зварювання лазер + МАG для з'єднання елементів великих конструкцій з нержавіючої сталі є відносно новою проблемою. В роботі обговорено питання технології гібридного зварювання аустенітної сталі X2CrNi18-9 і аустенітно-феритної X2CrNiMoN21-5-1 з використанням дискового лазера потужністю 12 кВт. Визначено технологічні умови гібридного зварювання з повним проплавленням стикових з'єднань сталі завтовшки 8, 12 і 20 мм, а також таврових з'єднань зі стиковим швом з частковим проплавленням. Зазначено типові дефекти зварних швів високолегованих нержавіючих сталей, виконаних гібридним зварюванням. Бібліогр. 5, рис. 20.

Ключові слова: гібридне зварювання, лазер + дуга, активний газ, нержавіючі сталі, параметри дуги і променя, розташування джерел, типові дефекти зварювання

PECULIARITIES OF HYBRID LASER-ARC WELDING OF STAINLESS STEEL

Turyk E., Banasik M., Stano S., Urbanchik M.

The use of hybrid laser-arc welding laser + MAG for joining elements of large structures of stainless steel is a relatively new problem. The paper discusses the issues of technology of hybrid welding of austenitic steel X2CrNi18-9 and austenitic-ferritic steel X2CrNiMoN21-5-1 using a disc laser of 12 kW capacity. The technological conditions of hybrid welding with a full penetration of butt joints of steel with a thickness of 8, 12 and 20 mm, as well as T-joints with a butt weld with a partial penetration were determined. The typical defects in welds of high alloy stainless steels, produced by hybrid welding, were indicated. 5 Ref., 20 Fig.

Keywords: hybrid welding, laser + arc, active gas, stainless steels, arc and beam parameters, location of sources, typical welding defects

Поступила в редакцію 27.06.2019