



ГИБРИДНАЯ ЛАЗЕРНО-ДУГОВАЯ СВАРКА ПОД ФЛЮСОМ

У. РАЙЗГЕН, С. ОЛЬШОК (Ин-т сварки и соединений, г. Аахен, Германия)

Представлен новый способ гибридной сварки для изготовления изделий с толстой стенкой (труб для строительства трубопроводов или деталей, используемых в судостроении) — гибридная лазерно-дуговая сварка под флюсом. Показаны преимущества и недостатки данного процесса, а также рассмотрено соответствие швов, выполненных этим способом сварки, промышленным требованиям.

Ключевые слова: гибридная сварка, лазерный луч, импульсная дуга, конструкционная сталь, разделка кромок, проплавление, формирование шва, энергетическая эффективность

Способ гибридной лазерно-дуговой сварки известен уже более 20 лет. Для этого процесса характерно то, что лазерный луч и дуга одновременно действуют в одной зоне сварки. В промышленности применяют два варианта гибридного лазерно-дугового процесса. Гибридная лазерная сварка с использованием ТИГ процесса позволяет соединять с очень высокой скоростью тонкие листы алюминия для изготовления подъемных приспособлений в задней части кузова грузового автомобиля и выполнять поверхностные швы высокого качества. Способ гибридной лазерно-дуговой сварки с использованием МАГ процесса применяется для соединения стальных и алюминиевых конструкций в судостроении и автомобильной промышленности. При исследованиях, выполненных в Институте сварки и соединений (ISF) гибридной лазерно-дуговой сварки, выявлен ряд проблем, например, появление пор в корне шва при сварке листов толщиной более 12 мм, что объясняется недостаточной дегазацией глубоких и узких лазерных швов [1].

С этой целью были предприняты попытки повысить эффективность гибридного процесса. Улучшение дегазации ожидается за счет замены МАГ сварки дуговой сваркой под флюсом (SA), поскольку при использовании последней металл находится дольше в расплавленном состоянии.

При гибридной лазерно-дуговой сварке дуговой процесс сопровождается понижением поверхности расплавленной ванны, и благодаря снижению положения фокуса увеличивается глубина проплавления шва [2, 3]. Последняя главным образом зависит от мощности и формы лазерного луча, ширина шва в основном определяется дугой (в частности, напряжением на дуге). По сравнению с чисто лазерно-лучевым процессом увеличение скорости сварки до 100 % было достигнуто при постоянной мощности лазерного луча [4, 5].

Энергетическая эффективность данного процесса сварки увеличивается за счет применения источника питания дуги, который по сравнению с лазером работает с более высокой эффективностью. Ввод энергии лазерного излучения в изделие осуществляется путем фокусирования, тепловложение при этом низкое. Отмечаются такие преимущества как, например, небольшая зона термического влияния (ЗТВ) или высокая скорость сварки при выполнении швов с большим коэффициентом формы. Недостатками являются значительная стоимость оборудования и низкая эффективность процесса при незначительной возможности перекрытия зазора.

При гибридной лазерно-дуговой сварке введение присадочного материала происходит за счет дугового процесса. Технология МАГ процесса имеет преимущество в том, что присадочная проволока расплавляется за счет относительно недорогой энергии, в то время как применением дорогой высококачественной энергии лазерного луча достигается лишь увеличение глубины проплавления. С позиционированием проволоки относительно лазерного луча, как правило, проблем не бывает, поскольку расположение дуги относи-

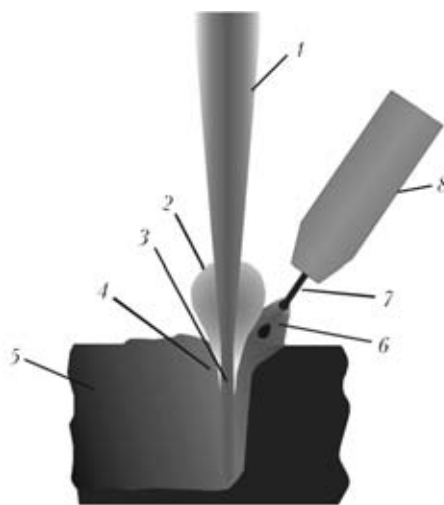


Рис. 1. Схема гибридной лазерно-дуговой сварки: 1 — лазерный луч; 2 — плазма; 3 — парогазовый канал; 4 — жидкая ванна; 5 — свариваемый материал; 6 — сопло GMA; 7 — присадочная проволока; 8 — горелка GMA

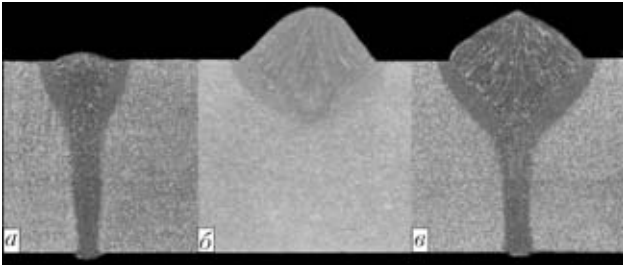


Рис. 2. Макрошлифы сварных соединений, выполненных лазерной (а), дуговой (б) и гибридной лазерно-дуговой (в) сваркой

тельно парогазового канала может фиксироваться визуально (рис. 1).

Применяется импульсная дуга от обычных источников сварки МАГ [6] или дуга постоянного тока в большинстве случаев в виде дуги со струйным переносом металла. Защита зоны сварки такая же, как и при сварке лазерным лучом в углекислом газе, гелии [2] или смеси гелия с аргоном. Присадочные материалы, как правило, те же, что и при сварке МАГ [7].

Для сварки толстых пластин используют в основном лазерный луч в углекислом газе, поскольку они обеспечивают более высокую мощность процесса, чем Nd:YAG-лазеры [8].

Стык подготавливают без скоса кромок, а также с V- и Y-образной их разделкой. В отличие от сварки лазерным лучом с применением холодной присадочной проволоки энергия лазерного луча не должна использоваться для расплавления присадочного материала, поскольку проволока подводится уже в расплавленном виде [9]. Присадочный материал оказывает определенное металлургическое влияние на металл сварной конструкции [10, 11].

В то время, как при сварке лазерным лучом получают в основном параллельные швы с высоким коэффициентом формы (рис. 2, а), гибридные лазерно-дуговые швы имеют расширение в верхней части (рис. 2, в), вследствие чего они приобретают треугольную форму в виде грибка или колокольчика [9].

Положение дуговой горелки относительно лазерного луча может быть разным. Горелка размещается по направлению сварки перед лазером (ведомое положение) [12] или после лазерного луча (ведущее положение) [13–16]. Сварка горелкой, направленной от валика, используется в основном при гибридной сварке алюминия, поскольку это обеспечивает контакт дуги без образования оксидного слоя (устранен лазерным лучом), что значительно повышает стабильность процесса [17].

Как следует из результатов исследований, выполненных ISF и университетом г. Аахен RWTH, при гибридной сварке (в частности, при соединении листов толщиной более 12 мм) имеет место склонность к образованию пор [18]. Причиной

этого является наличие глубокого канала дегазации. Избежать появления пор можно за счет длительного удержания расплавленной ванны.

При гибридной лазерно-дуговой сварке под флюсом (LUPuS) удержание расплавленной ванны более продолжительное, что создает благоприятные условия для дегазации. Оба источника энергии при этом перемещаются к зоне сварки на максимально близкое расстояние (13...15 мм).

Дуговая сварка под флюсом — это высококачественный, надежный и эффективный процесс, который на протяжении многих лет успешно применяли в судостроении, машиностроении и при строительстве трубопроводов. При этом способе сварки горение дуги невидимое, внутри парогазового канала дуга защищена от атмосферного влияния. Полость сварки окружена жидким шлаком, состоящим из расплавленного сварочного флюса. Шлак создает высокую степень тепловой эффективности с хорошей дегазацией расплавленной ванны, а также способствует образованию гладкого валика, имеющего поверхность без зазубрин. При использовании комбинации проволока-флюс, адаптированной к основному материалу, получают швы высокого качества. Недостатками являются малая глубина проплавления и большой объем расплавленной массы, что делает необходимым применение подкладки.

Комбинация лазер-дуга под флюсом как способ соединения исследован не был. Насколько известно, комбинация сварки под флюсом и сварку лазерным лучом исследовалась мало [19, 20]. В исследованиях пространственное положение этих двух процессов и разделение шва на область лазерного шва и шва, выполненного под флюсом, было значительным. При этом смешивания материала швов не происходило. Во время сварочного процесса с использованием лазерного луча они подверглись только предварительному нагреву, который заканчивался эффектом синергии точечного увеличения скорости процесса сварки под флюсом.

Соединить два процесса — сварку лазерным лучом и сварку дугой под флюсом в одной сварочной ванне, как оказалось, сложно, поскольку флюс проваливается в парогазовый канал лазерного луча, при этом лазерное излучение поглощается флюсом, а не свариваемым материалом. По этой причине актуальной задачей является разработка и выпуск оборудования, которое предотвращало бы выпадение флюса. Одним из вариантов может быть использование разделительной пластины (разработка RWTH), которая устанавливается между лазерным лучом и механизмом подачи флюса (рис. 3) [21]. Защитный газ, необходимый для сварки лазерным лучом, поступает против направления сварки на разделительную пластину, чтобы сдувать флюс, который может попасть в зону лазерной сварки через зазор между изделием и листом.

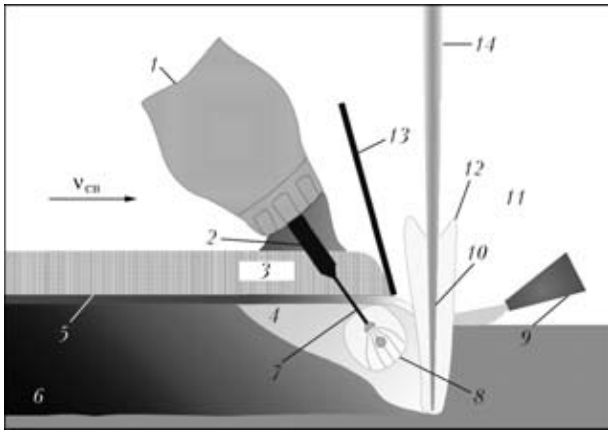


Рис. 3. Схема гибридной лазерно-дуговой сварки под флюсом: 1 — бункер для флюса; 2 — контактная трубка; 3 — флюс; 4 — жидкая ванна; 5 — твердый шлак; 6 — металл шва; 7 — проволочный электрод для дуговой сварки под флюсом; 8 — полость шва с дугой; 9 — струя гелия; 10 — парогазовый канал; 11 — жидкий шлак; 12 — плазма с парами металла; 13 — разделительная пластина; 14 — лазерный луч

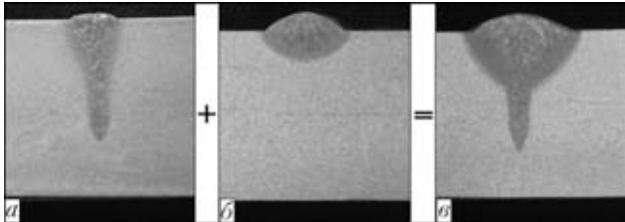


Рис. 4. Макрошлифы швов, выполненных лазерной (а), дуговой (б) и лазерно-дуговой (в) сваркой

Расстояние между разделительной пластиной и сварным изделием имеет немаловажное значение. Оно должно быть таким коротким, чтобы как можно меньше выпадало флюса, и в то же время настолько длинным, чтобы выпавший шлак не прилипал к разделительной пластине. Угол ее наклона также имеет важное значение: если он достаточно большой, то лазерный луч может попадать на разделительную пластину и быть ею поглощенным, если же слишком мал, то дуга может гореть между разделительной пластиной и

присадочной проволокой. При этом поток защитного газа не должен быть слишком интенсивным, поскольку дуга процесса SA может быть им сдута, что приведет к образованию пор в сварном шве. На рис. 4 представлены макрошлифы швов, выполненных указанными гибридными способами сварки.

При дуговом процессе глубокое проплавление не достигается. На рис. 5 показано, что при лазерной сварке уменьшение твердости металла имеет место главным образом в корне шва, а также возможно в его центре.

На микрошлифах видно, что тепловложение в изделие при гибридной сварке выше, чем при лазерной сварке (рис. 6). На рисунке хорошо видно, что полосы перлита в ЗТВ этого шва длиннее, чем в лазерном шве. Структура металла гибридного шва в его лазерной части более мелкозернистая. Это тот эффект, который достигается при гибридной сварке, вследствие получения более пластичного по сравнению с лазерной сваркой металла шва.

Верхний валик, выполненный гибридным способом, идентичен шву, выполненному сваркой под флюсом. Для него характерен плавный переход к листу без подрезов, при этом можно влиять на усиление шва путем использования выбора подходящей скорости подачи проволоки и напряжения. Внешний вид корня шва отличается от корня шва, полученного при сварке лазерным лучом: шлакообразующие элементы процесса SA способствуют формированию узкого, бесчешуйчатого, блестящего, низкого валика.

При испытаниях гибридного способа сварки использовали осевой быстроточный лазер (Trumpf Lasertechnik) с неустойчивым резонатором TLF 20.000, полностью электронный, со вспомогательным выключателем и программируемым управлением источник питания для МИГ/МАГ импульсно-дуговой сварки (тип Гибрид 6000 МР, АМТ), а также специальную головку для лазерной

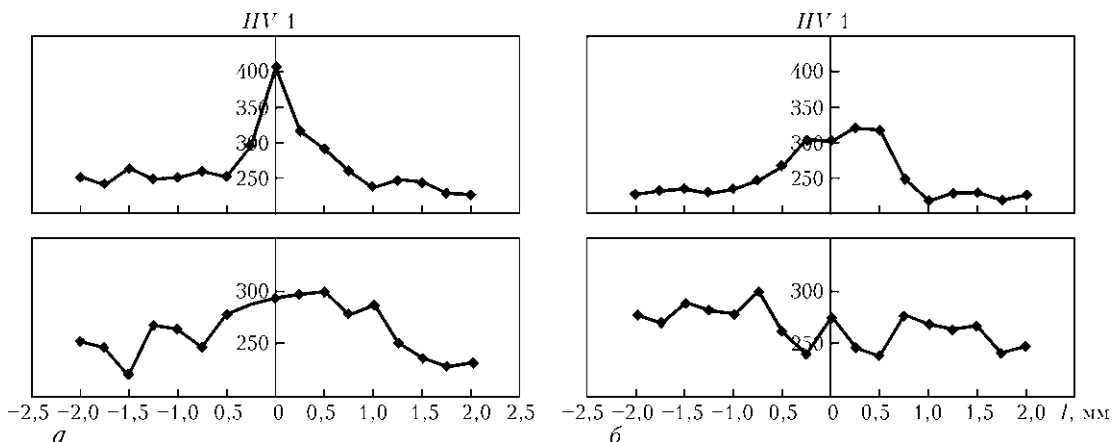


Рис. 5. Распределение твердости HV 1 в металле сварных соединений, выполненных лазерной (а) и LUPuS (б) сваркой

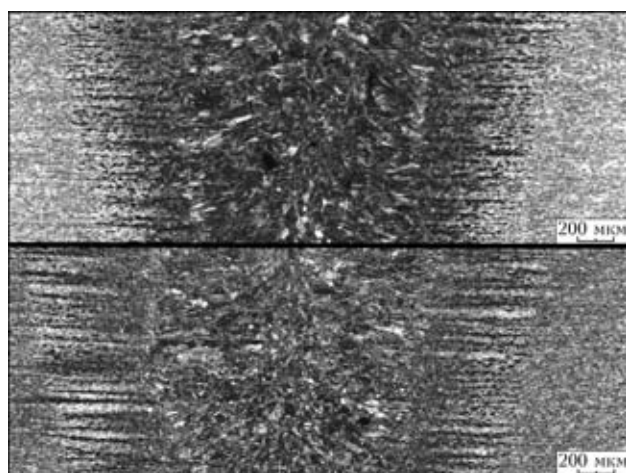


Рис. 6. Микрошлифы центральной части швов, выполненных лазерной (а) и гибридной (б) сваркой

гибридной сварки. На рис. 7 показана установка для осуществления гибридного процесса сварки.

При испытаниях применяли следующие материалы: сталь АН 36 толщиной 8,0 и 20,3 мм, используемую в судостроении; конструкционную сталь S355 J2G3 толщиной 14 мм; высокопрочную, термомеханически обработанную, прокатную, мелкозернистую, конструкционную сталь Х65 толщиной 38 мм, а также такие присадочные материалы, как проволока SA S2Si диаметром 1,6 мм и флюс SA OP 122.

Испытания проводили в нижнем положении, в некоторых случаях применяли подкладку.

Специально для судостроения выполнены исследования сварки листов стали АН 36 толщиной 8 мм с кромками, полученными плазменной резкой. Целью экспериментов было показать возможность перекрытия зазоров (от 0 до 0,4 мм) в тонких листах стали. При этом скорость сварки была следующая: 1,6 м/мин (нулевой зазор), 1,4 м/мин (зазор 0,2 мм) и 1,2 м/мин (зазор 0,4 мм) (рис. 8). Расплавленный металл имел склонность к разрушению в следующих случаях: при установлении широкого зазора, малом напряжении, сварки под флюсом и недостаточном проплавлении. При сварке тонких стальных пластин ширина зазора играет важную роль. Для устранения зазора можно использовать более тонкую проволоку, что позволяет лучше дозировать напряжение во время сварки. Определено, что процесс гибридной

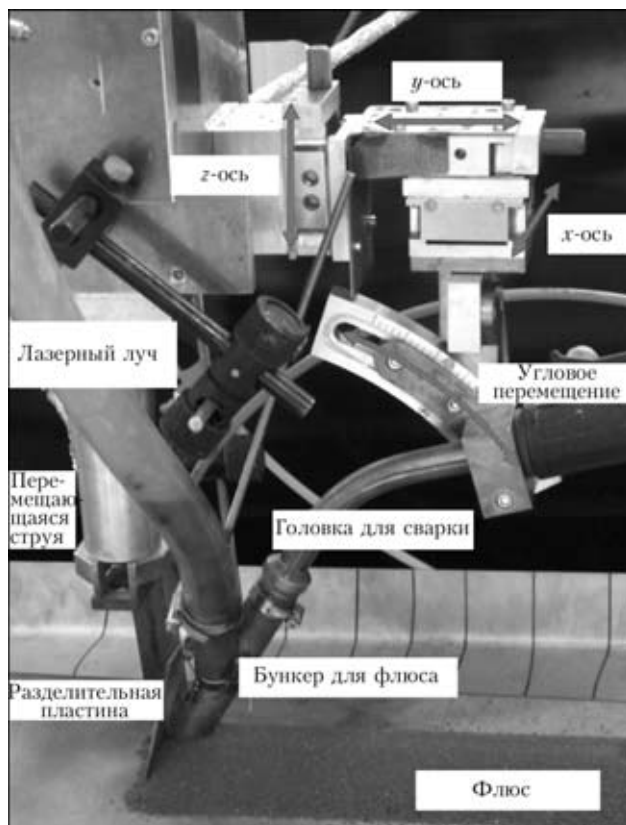


Рис. 7. Установка для процесса гибридной сварки

сварки хорошо подходит для работ в судостроении, если сварка выполняется без зазоров.

У-образная разделка кромок применяется при сооружении трубопроводов. При испытаниях кромки подготавливали газовым пламенем, а потом грубо зачищали. Неточность в разделке кромок была результатом непровара корня шва и составляла в основном менее 5 мм. На рис. 9 представлены макрошлифы такого шва. Шов, показанный на рис. 9, а, сварен за один проход как и шов, представленный на рис. 9, б, на режиме $v_{св} = 0,8$ м/мин, $P = 12$ кВ; обратный проход осуществлен способом SA. Этот шов, выполненный двухсторонней сваркой с одним проходом, был подвергнут поперечному испытанию на растяжение и на изгиб с надрезом при температуре -20 °С. Результаты испытания на растяжение показали, что все образцы разрушались по основному материалу, который не был подвержен влиянию, кроме шва. При испытании на растяжение (ори-

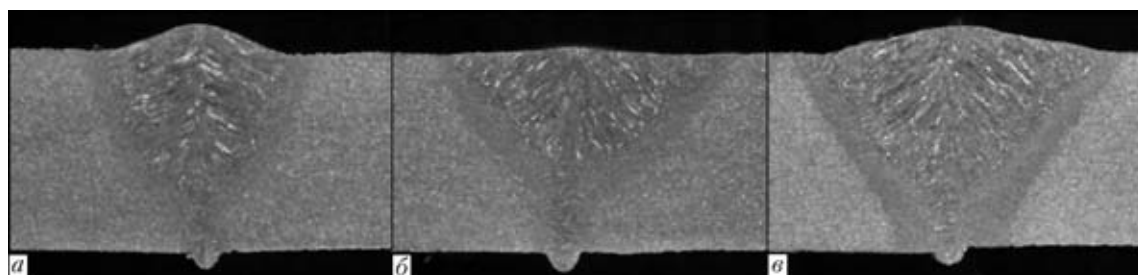


Рис. 8. Макрошлифы сварных соединений, выполненных на листах стали толщиной 8 мм с V-образной разделкой кромок плазменной резкой с нулевым зазором (а), а также с зазором 0,2 (б) и 0,4 мм (в)

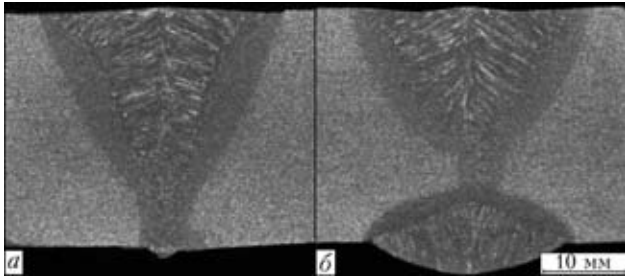


Рис. 9. Макрошлифы швов, выполненных на листах стали толщиной 11 мм с Y-образной разделкой кромок под углом 16° с нулевым зазором: а, б — см. в тексте

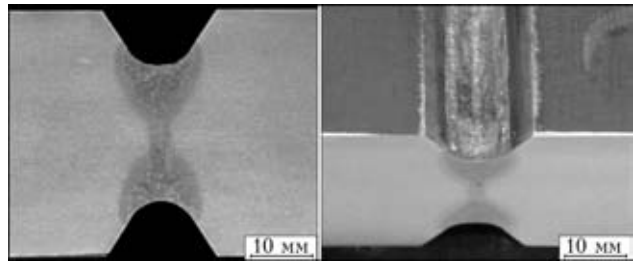


Рис. 11. Макрошлиф сварных соединений, полученных на пластинах стали шириной 38 мм двухсторонней однопроходной сваркой с разделкой кромок под углом 70°



Рис. 10. Макрошлиф шва, выполненного на листах стали толщиной 20,3 мм с V-образной разделкой кромок пламенной резкой с нулевым зазором

ентация на центр шва) значения ударной вязкости находились в диапазоне 78...152 Дж, поверхность излома указывает на наличие зоны перехода кривой A_V/T .

Таким образом, еще раз были продемонстрированы преимущества этого способа сварки. Полученный шов по механико-технологическим свойствам удовлетворял нормативным требованиям. Для определения возможностей данного способа сварки еще больше увеличили глубину проплавления. Как известно из области лазерной сварки, при глубине проплавления 15 мм расплавленный металл имеет склонность к разрушению. Это является причиной того, что, начиная с указанной толщины пластины стали, большая часть сварочных деформаций распределяется в поперечном направлении. С целью противодействия этому при испытаниях применяли флюсовую подкладку. На рис. 10 представлен макрошлиф шва, выполненного лазером с мощностью 20 кВт при скорости сварки 0,8 м/мин. Доказано, что можно сваривать лист с одной стороны приблизительно за 20 мин.

Для определения наиболее экономически выгодного способа сварки толстостенных деталей, т. е. сварки с минимальным количеством проходов, проведены исследования поверхности при-

тупления, которая при двухсторонней однопроходной сварке бывает очень широкой. Результаты испытаний представлены на рис. 11. Рентгеновский контроль подтвердил, что в металле шва пор нет, заметно глубокое проплавление. В дальнейшем запланированы испытания с большими поверхностями притупления. В этой работе исследовали возможность применения гибридного способа сварки для наплавки валиков на стальные листы толщиной от 8 до 38 мм и получения соединений с различными типами разделки кромок.

В дальнейшем ожидается усовершенствование указанного способа сварки и более широкое его применение с использованием эффективных твердотельных лазеров, благодаря которым уменьшается риск плазменного экранирования излучения. Более короткая волна излучения твердотельного лазера легче поглощается в обрабатываемом материале. Оборудование также легче усовершенствовать при более короткой длине волны, поскольку можно избежать сложного способа наведения луча через оптику, лазерный луч можно наводить через световодные кабели и оптику сварочной головки. Постоянный прогресс в области разработки способов лазерной сварки дает возможность для дальнейшего широкого использования этого способа сварки. С целью улучшения дегазации и качества шва (с минимальным количеством пор или без них) предпринято расширение или стабилизация парогазового канала. Это можно осуществить путем сварки с приспособленной для этого колеблющейся оптикой.

Добавление защитных газов (или газа) также следует испробовать при дальнейшей работе в этой области. При использовании эффективных твердотельных (волоконных) лазеров можно менять защитный газ, который будет распределяться и сжиматься воздушной струей с целью очистки зоны лазерной обработки, что делает данный способ сварки более экономичным.

В итоге установлено, что LUPuS является наиболее приемлемым для промышленности вариантом гибридной лазерно-дуговой сварки. Этот способ сварки будет и дальше развиваться с использованием менее дорогих, более надежных и универсальных источников питания лазера.

Институт сварки и соединений хочет выразить благодарность компаниям, которые содействовали данным исследованиям и в первую очередь ESAB GmbH и AMT Maschinen- und Geratetechnik.

1. Dilthey U., Olschok S. Untersuchungen zur Nutzung der Synergieeffekte beim Hochleistungs-Laser Hybridschweißen von dickwandigen Rohrkoerpern aus C-Mn-Staehlen: (Abschlussbericht des AiF-Forschungsvorhabens). — 2004. — № 13. — 407 S.
2. Abe N., Hayashi M. Trends in laser arc combination welding methods // Welding Intern. — 2002. — 16, № 2. — P. 94–98.
3. Hybrid welding of steel for offshore applications / C. Walz, I. Stiebe-Springer, M. El Rayes, T. Seefeld et al. // Proc. of the 11th Intern. offshore and polar engineering conference and exhibition (ISOPE 2001), Stavanger, Norwegen, 2001. — Stavanger, 2001. — P. 263–266.
4. Dilthey U., Luder F., Wieschemann A. Laserstrahlschweißen in der Fertigung — Einsatz und Entwicklung, Baender Bleche Rohre. — 1996. — 37, № 11. — S. 26–39.
5. Wieschemann A. Entwicklung des Hybrid- und Hydraschweißverfahrens am Beispiel des Schiffbaus: Dissertation. — Aachen, 2001.
6. Stand und Perspektiven der Strahltechnik / U. Dilthey, M. Dobner, A. Ghandehari et al. // Konferenz Strahltechnik, Halle, 1996. — S. 1–13.
7. Aluminium-Strangpressprofile im Schienenfahrzeugbau, geschweißt mit dem Hybridverfahren Nd:YAG-Laser/MIG / Ch. Maier, P. Reinhold, H. Maly et al. — Duesseldorf: DVS-Verlag, 1996. — S. 198–202.
8. Keller A. CO₂-Laserstrahl-MSG Hybridschweißen von Baustuehlen im Blechdickenbereich von 12 bis 25 mm: Dissertation. — Aachen, 2001.
9. Behler K., Maier Ch., Wieschemann A. Kombiniertes Laser-Lichtbogenschweißen — Erweiterungspotential fuer die Lichtbogentechnik, Aachener Schweißtechnik Kolloquium, (ASTK'97), Shaker Verlag, Aachen, 1997. — S. 151–172.
10. Untersuchungen zum Laserstrahlschweißen hochkohlenstoffhaltiger Staehle unter Einsatz von Zusatzwerkstoff: (Abschlussbericht) / DFG-Forschungsvorhabens; U. Dilthey, F. Luder. — № 434/18-4. — 1997.
11. Untersuchung der Randbedingungen fuer die Bildung von «acicular ferrite» in Schweißgutern bei schneller: (Abkuehlung): Abschlussbericht) / AiF-Forschungsvorhabens; U. Dilthey, M. Biesenbach. — 2000. — № 11. — S. 377.
12. Kutsuna M., Chen L. Research on laser-MAG hybrid welding of carbon steel // 7th Intern. welding symp. of Japan Welding Society, Kobe, Japan, 2001. — Kobe, 2001. — P. 403–408.
13. Yoneda M., Katsumura M. Laser hybrid processing // J. of Japan Welding Soc. — 1989. — 58, № 6. — P. 427–434.
14. Pat. JP 59-66991 Japan. Welding method taking laser with MIG / M. Hamasaki. — Publ. 1984.
15. Pat. US 4507540 Japan. Welding method combining laser welding and MIG welding / M. Hamasaki. — Publ. 1985.
16. Makino Y., Shiihara K., Asai S. Combination welding between CO₂ laser beam and MIG arc // Welding Intern. — 2002. — 16, № 2. — P. 99–103.
17. Maier Ch. Laserstrahl-Lichtbogen Hybridschweißen von Aluminiumwerkstoffen: Dissertation. — Aachen, 1999.
18. Dilthey U., Woeste K., Olschok S. Modern beam-welding technologies in advanced pipe manufacturing // Konferenz-Einzelbericht EuroSteel-2005.
19. Combination of laser beam and submerged arc processes for the longitudinal welding of large welded pipes / J. C. Coiffier, J. P. Jansen, G. Peru, J. Claeys // Intern. symp. of high strength steels, Trondheim, Norway, 1997. — Trondheim, 1997.
20. Krivstun I., Seyffarth P. Laser arc processes and their applications in welding and material treatment. — London: Taylor & Francis, 2002.
21. Deutsche Patentanmeldung N 20 2005 024 457.2. Verfahren und Vorrichtung zum Schweißen von Werkstuecken / RWTH Aachen. — Publ. 2005.

The new hybrid welding method for manufacture of thick-walled parts, e.g. pipes, in construction of pipelines or marine parts, i.e. hybrid laser + submerged arc welding, is presented. Advantages and disadvantages of this process are shown, and compliance of the welds made by this method with industrial requirements is considered.

Поступила в редакцию 06.10.2008

ПОРОШКОВАЯ ПРОВОЛОКА ППР-АНЗ ДЛЯ ПОДВОДНОЙ РЕЗКИ

Предназначена для механизированной подводной резки без подачи кислорода в зону горения дуги углеродистых и легированных сталей, алюминия, титана и их сплавов толщиной до 40 мм на глубине до 60 м. Скорость резки малоуглеродистой стали толщиной 20 мм составляет 15 м/ч при расходе проволоки 0,6 кг/п.м реза.

Применение. Для расчистки русел рек от затонувших кораблей, при ремонте шпунтовых стенок, судоподъеме, выполнении аварийно-спасательных операций и других работ.

Контакты: Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11.
Отд. № 18, Максимов Сергей Юрьевич
Тел./факс: (38044) 287 31 84
E-mail: maksimov@paton.kiev.ua