



## ГИБРИДНАЯ ЛАЗЕРНО-ДУГОВАЯ СВАРКА ДЛЯ СОЕДИНЕНИЯ ТРУБ

С. КАЙТЕЛЬ, д-р-инж., Я. НОЙБЕРГ, инж. (Учеб.-исслед. ин-т, г. Галле (Зале), Германия)

Рассмотрена перспективность применения гибридной лазерно-дуговой сварки для соединения труб при строительстве трубопроводов. Показано, что сочетание гибридной сварки с дуговой позволяет формировать полнопрофильное сечение металла шва при толщине стенки трубы 10 мм. Гибридную сварку также можно успешно применять при выполнении корневого прохода в соединениях труб с притуплением 12...15 мм.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, гибридная лазерно-дуговая сварка, трубопроводы, технология сварки, аппаратура, производительность сварки, монтажные условия

Трубы большого диаметра для нефте- и газопроводов на протяжении многих лет соединяют испытанным и хорошо себя зарекомендовавшим способом дуговой сварки. В зависимости от длины прокладываемого трубопровода, толщины стенки отдельных труб и материала, из которого они изготовлены, применяют различные варианты этого способа сварки — от ручной дуговой штучными электродами (рис. 1) до орбитальной дуговой сварки МАГ, выполняемой на специальных установках. При этом перемещение поста производится сварщиком не вручную, а механически с помощью систем, которые приводятся в действие двигателем, и зажимных приспособлений, расположенных по всему периметру трубы. Если длина трубопровода и профиль местности позволяют, то применяют сразу несколько орбитальных установок, причем каждый отдельный пост предназначен для сварки одного или двух слоев, после чего он перемещается на следующий стык, где продолжается сварка таких же швов. Как правило, каждая установка оснащена несколькими сварочными головками [1]. Такое конструктивное решение свидетельствует о высоком уровне развития оборудования и сварочной технологии, однако характеризуется в то же время большими затратами с точки зрения комплектации и технического обслуживания (рис. 2).

В связи с нехваткой энергоресурсов разработки подземных недр ведутся во все более сложных условиях. При растущих потребностях в надежном энергоснабжении в Германии и Европе остро стоит вопрос о создании новых мощных технологий прокладки трубопроводов, соответствующих современным запросам. Проблемой является то, что применяемые дуговые процессы с точки зрения производительности процесса плавления и скорости сварки достигли уже своего предела

и значительного улучшения в этой области не даст даже оптимизация оборудования.

В этих условиях актуальным является разработка таких высокопроизводительных процессов сварки, которые позволяют сократить количество проходов при многослойной сварке, а также снизить затраты на персонал и оборудование.

Перспективными в плане выполнения этих требований с точки зрения и технологии, и аппаратуры являются сварочные процессы на базе лазера.

Применение гибридной лазерно-дуговой сварки открывает новые возможности. Оба эти процесса сварки тесно связаны, поскольку и лазерный луч, и дуга взаимодействуют в общей жидкой ван-



Рис. 1. Вид верхнего слоя шва, выполненного на трубе ручной дуговой сваркой



Рис. 2. Монтажная площадка для прокладки трубопровода

не. Совместное воздействие обоих источников энергии и присадочного материала позволяет достичь высокой эффективности процесса сварки. При этом очень важны синергетические эффекты, которые проявляют и усиливают преимущества каждого из двух способов сварки.

Шов получается таким же глубоким, как при лазерной сварке, а перекрытие зазора гораздо лучше. При соединении тонких листов можно достичь очень высокой скорости сварки, иногда во много раз большей, чем при сварке в защитном газе. При сварке более толстых листов преимущество состоит в том, что вместо обычных многослойных швов сварку можно выполнять за один проход и часто без дополнительной разделки кромок. На рис. 3 представлен вид шва типичной формы, выполненного гибридной лазерно-дуговой сваркой на листе толщиной 8 мм.

Применение лазерных источников в условиях монтажных площадок стало возможным благодаря бурному развитию этой области. Лучевые источники последнего поколения (так называемые оптоволоконные лазеры) имеют не только большую мощность, но и надежную компактную конструкцию. Они характеризуются высоким КПД и превосходным качеством луча (в отличие от обычных лазерных источников —  $\text{CO}_2$ - или Nd:YAG-лазер) в связи с этим существуют все предпосылки для их широкого применения. Последние пять лет мобильные оптоволоконные лазеры успешно используются в судостроении и при строительстве трубопроводов [2].

Целью описанных ниже исследований было определение возможностей использования технологии и аппаратуры для гибридной лазерно-дуговой сварки применительно к соединениям труб с учетом таких важных аспектов, как допуски, влияние внешней среды, мобильность сварочного оборудования, а также возможность сварки в принудительном положении в монтажных условиях.

Основным направлением в исследованиях была возможность использования типичного для лазера эффекта глубокого провара для получения высококачественного свободного корневого слоя с высотой притупления 6...10 мм. Для этого сравнивали варианты лазерных и дуговых систем, которые применяют для гибридной сварки стыковых соединений с различными типами разделки кромок.

Для соединения труб выбран способ сварки двух швов сверху вниз, при котором значительно уменьшается необходимая для формирования шва степень свободы при компоновке лазерного луча и дуги. После определения технологических параметров гибридной сварки первого слоя в структуру эксперимента нужно было интегрировать процесс дуговой сварки МАГ, чтобы за один оборот получить на листе толщиной до 12 мм зам-

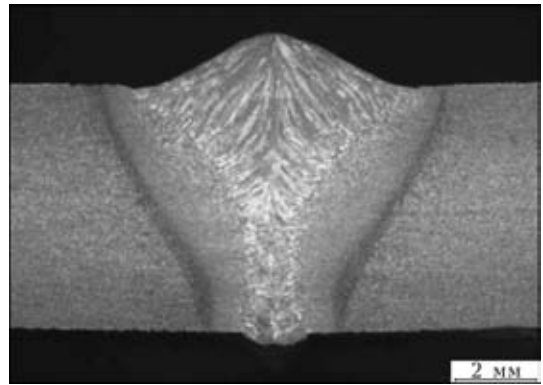


Рис. 3. Макрошлиф сварного соединения, полученного гибридной лазерно-дуговой сваркой

кнутый профиль шва. Предполагалось, что второй процесс сварки сможет положительно повлиять на механико-технологические свойства выполняемого сварного шва.

Чтобы подтвердить технологическую целесообразность гибридного лазерно-дугового процесса орбитальной сварки применяли обычные технологии. Базовым оборудованием для выполнения исследований служила поворотная система для труб фирмы «Gullco» (рис. 4).

Указанная система оснащена трактором на кольцевой направляющей для перемещения по кругу, тактильными системами слежения за швом и управления, базирующимися на установочных осях для регулирования процессом сварки относительно разделки кромок. В процессе сварки тактильный датчик располагается впереди по направлению движения.

Сварочную головку с различными элементами жесткости адаптировали к установочной оси для регулирования по высоте. Для реализации воз-



Рис. 4. Установка для орбитальной сварки МАГ



Таблица 1. Варианты компоновки лазерный луч + дуга МАГ

№ варианта	Основной процесс (нейтральное положение)	Второй процесс (положение)	Схема процесса
1	Лазерный луч	Горелка впереди (наклон назад)	
2		Горелка позади (наклон вперед)	
3	Дуга	Лазерный луч впереди (наклон вперед)	
4		Лазерный луч позади (наклон назад)	

можных серийных вариантов (табл. 1) система лазерный луч+дуга МАГ может иметь дополнительные средства перемещения горелки и луча (рис. 5).

В табл. 1 для упрощения эксперимента лазерный луч или дуга представлены в нейтральном положении. От промежуточных ступеней сознательно отказались.

Применяли две различные системы оптоволоконного лазера. На первом этапе исследований при высоте притупления до 6 мм использовали оптоволоконный лазер мощностью 4,5 кВт (рис. 6, а), а на втором при высоте притупления 8 мм в эксперименте — лазер мощностью 10 кВт Учебно-исследовательского института земли Мекленбург-Форпоммерн (рис. 6, б).

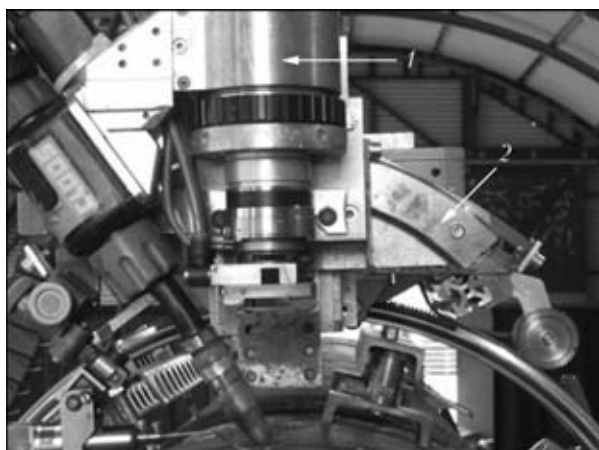


Рис. 5. Реализация дополнительных средств перемещения серийной системы лазерный луч+дуга МАГ: 1 — поворотный шарнир с опорой для перемещения горелки; 2 — направление дуги под углом к стыку

Первый оптоволоконный лазер, который применили для сварки лазерным источником мощностью 4 кВт, был выпущен в 2003 г. и за годы эксплуатации подтвердил свою эффективность.

Для получения замкнутого профиля шва к сварочной головке подсоединили еще одну дуговую горелку (рис. 7), что позволило за один оборот сварить гибридной сваркой корень, а сваркой МАГ — верхний слой, т. е. благодаря двум швам, выполненным сверху вниз, обеспечили полное заполнение кромок.

Сваривали отрезки труб длиной до 6 м. По этой причине допуски к соединениям были большими по сравнению с соединениями калиброванных труб, особенно с точки зрения качества, в том числе и по величине смещения кромок. С учетом изложенного выше для выполнения сварки применяли установку опытной конструкции (рис. 8).



Рис. 6. Внешний вид лазерных систем, применявшихся в экспериментах

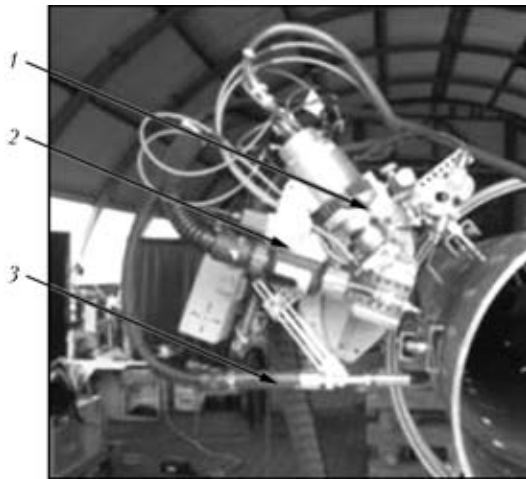


Рис. 7. Сварочная головка с гибридной оснасткой для сварки корня и дуговая горелка для заполнения разделки: 1 — лазерная оптика; 2 — гибридная дуга; 3 — сварка МАГ верхнего слоя



Рис. 8. Сварка труб с помощью установки опытной конструкции

Исследования проводили на двух лазерных источниках разной мощности. На первом этапе исследований у лазера мощностью 4,5 кВт были определены основные параметры гибридной дуги и чувствительность гибридного процесса к допускам при постоянно изменяющемся положении сварки по периметру трубы. Второй этап исследований был посвящен оценке потенциала гибридного процесса при использовании более мощного (10 кВт) оптоволоконного лазера и одновременном увеличении высоты притупления в корневом слое с 6 до 8 мм.

При проведении сварочных экспериментов были поставлены следующие задачи: удаление внутреннего покрытия на всех соединяемых кромках; измерение толщины стенки, высоты и ширины притупления каждой соединяемой кромки; прихватка стыка с внешней центровкой таким образом, чтобы продольный шов подсоединяемой трубы стыковался с продольным швом приваренной трубы; замер смещения кромок и воздушного зазора на прихваченном стыке; установление положения

фокуса и геометрических параметров заново для каждого стыка; направляющей для тактильного слежения за швом служит стационарно закрепленная труба; сварка двух швов осуществляется сверху вниз (после выполнения первого слоя смена ориентации на второй шов сверху вниз); вырезка макрошлифов выполняется из участков, соответствующих углам поворота сварочной головки 45, 90, 150° и 315, 270 и 210°.

В табл. 2 показаны макрошлифы первого слоя, полученного гибридной сваркой, и всего профиля замкнутого шва с предпочтительной разделкой кромок при мощности лазера 4,6 и 6,5 кВт.

Благодаря допускам, замеренным на стыках труб, и соответствующим им сварочным параметрам имеются точные данные о воздействии допусков на процесс сварки. Этот этап исследований завершился определением твердости металла в области корня шва, поскольку именно там доминирует лазерный луч и возможно повышение твердости. Для сравнения исследовали первый гибридный слой и замкнутый профиль шва, сва-

Таблица 2. Макрошлифы соединений, полученных гибридной сваркой

Разделка кромок	Первый слой	Замкнутый профиль шва
<i>Лазер мощностью 4,6 кВт, высота притупления 6 мм</i>		
<i>Лазер мощностью 6,5 кВт, высота притупления 8 мм</i>		

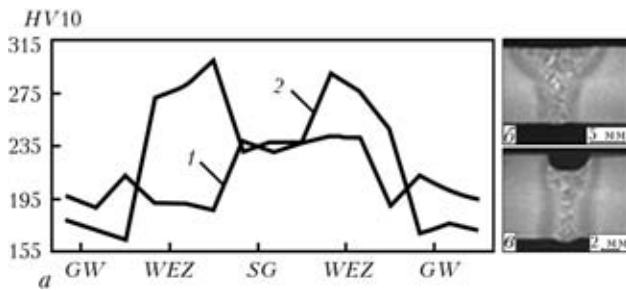


Рис. 9. Зависимость твердости в области корня шва от пространственного положения сварочной головки (а) и макрошлифы, полученные с подкладкой (1, б) и без (2, в): GW, WEZ, SG — пространственное положение сварочной головки

ренный дугой, следующей за лучом, результаты представлены на рис. 9.

Важным объектом исследований было определение типичных при строительстве трубопроводов допусков и исследование их влияния на процесс гибридной сварки. На всех соединяемых кромках измеряли толщину стенки, высоту и ширину притупления, ширину зазора в стыке и смещение кромок.

Качество выполненного шва исследовали методами неразрушающего и разрушающего контроля. Сначала проводили ультразвуковой контроль (методом фазированных решеток) и контроль просвечиванием. С помощью металлографии определяли положение и размер выявленных внутренних дефектов (рис. 10) [3].

На основе полученных данных построены диаграммы, с помощью которых объясняются нештатные ситуации, последние сопоставляются с результатами сварки в зависимости от определенных предварительно допусков.

Основной целью описанных исследований была проверка технологии и оборудования для гибридной сварки труб при строительстве трубопроводов в сложных условиях монтажа. Получена важная информация об имеющихся недостатках конструкции оборудования: слишком малая скорость сварки (увеличить до 3 м/мин); необходимость согласования мощности лазера с положением, в котором выполняется сварка; переналадка оборудования, которая при изменении направления

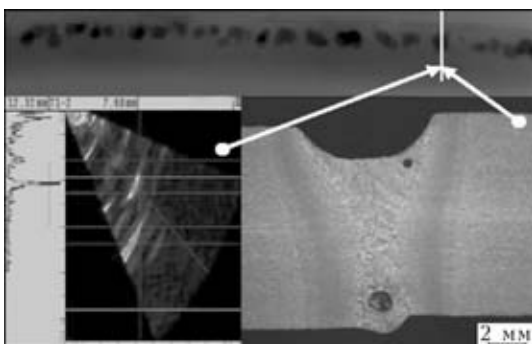


Рис. 10. Макрошлиф участка шва с дефектами, обнаруженными методами неразрушающего контроля

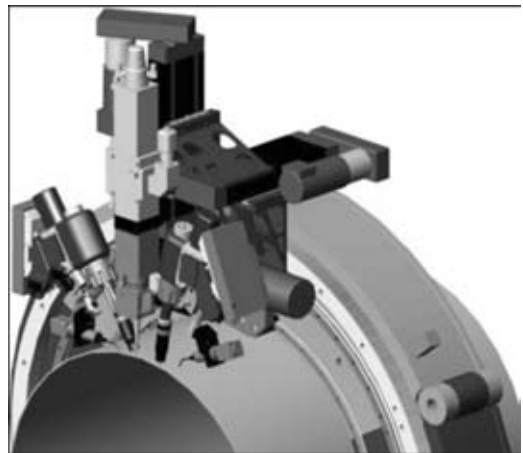


Рис. 11. Проектный вариант оборудования для гибридной сварки труб усовершенствованной поворотной конструкции

или ориентации сварки занимает много времени и вследствие многопозиционной настройки является источником образования дефектов; существующая технология по своим механическим свойствам не отвечает требованиям процесса сварки.

На рис. 11 показан внешний вид проектного варианта оборудования для гибридного процесса орбитальной сварки конструкций без указанных недостатков.

Реализованный на этой базе и предоставленный для последующих экспериментов прототип оборудования (рис. 12) имеет следующие технические характеристики: скорость перемещения при позиционировании до 6 м/мин; скорость сварки до 3 м/мин; диаметр свариваемых труб 500...700 мм; изменение параметров режима в зависимости от положения сварки; слежение за направлением шва. Встроенная лазерная головка может быть подсоединена к любому оптоволоконному твердотельному лазеру мощностью до 20 кВт.

Целью очередной серии исследований была оптимизация процесса сварки первого слоя на трубах с толщиной стенки от 10 мм и разной высотой притупления, осуществляемого с помощью оптоволоконной лазерной системы YLS-12000, внедренной с 2003 г., мощностью 12 кВт (рис. 13) в сварочном

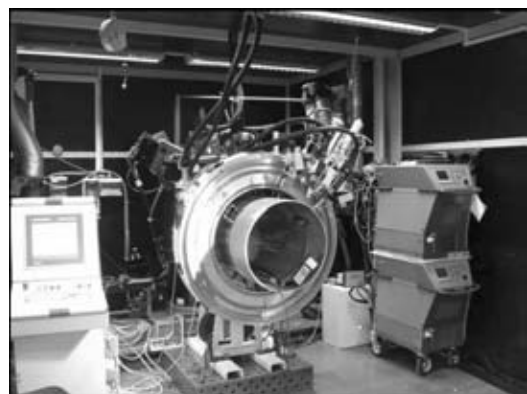


Рис. 12. Прототип оборудования для гибридной сварки трубопроводов



Рис. 13. Оптоволоконная лазерная система YLS-12000



Рис. 14. Рентгенограмма участков в области нахлестки стартовых зон (положение 12 ч)

Учебно-исследовательском институте, г. Галле (Зале).

В центре внимания проводимых исследований, с одной стороны, была возможность формирования валика и корня при данной мощности лазера, а с другой, — область нахлестки начала и конца двух швов, выполненных сверху вниз по периметру трубы. На рис. 14 представлен результат контроля просвечиванием в области нахлестки стартовых зон при толщине стенки трубы, которая составляла 10 мм.

С помощью металлографических исследований контролировали зоны сварного шва на наличие внутренних дефектов. Чтобы получить данные о влиянии допусков на сборку при более высокой мощности лазера и скорости сварки в экспериментах принимали допуски, типичные для труб. На рис. 15 для примера показан макрошлиф соединения в положении 3 ч при толщине стенки трубы 10 мм.

В конце исследований проведен контроль материала L360NB для определения его механико-технологических характеристик. Результаты испытания на растяжение приведены в табл. 3, сред-

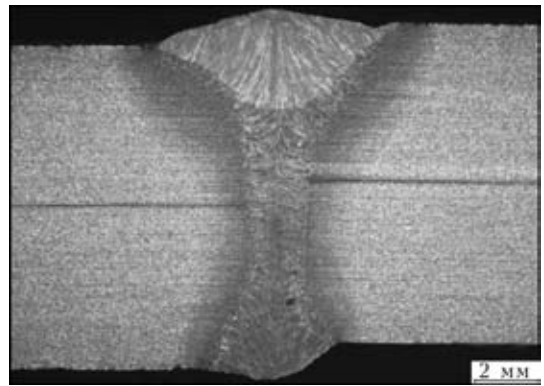


Рис. 15. Макрошлиф сварного соединения при смещении кромок на 1 мм

Таблица 3. Результаты испытания на растяжение

Предел текучести $\sigma_{0,5}$ , МПа	Временное сопротивление $\sigma_B$ , МПа	Удлинение при разрыве $\delta$ , %	Сужение при разрыве $\psi$ , %
345	532	42	71
368	539	39	69

нее значение ударной вязкости образцов типа ISO-V при температуре испытаний 0 °С составляла 136...177 Дж/см<sup>2</sup>.

Таким образом, для экономичности строительства трубопроводов необходимы исследования новых способов соединения отрезков труб сваркой. Первоочередной задачей является повышение скорости сварки при уменьшении количества слоев. С этой целью альтернативой может стать гибридная лазерно-дуговая сварка, поскольку благодаря оптоволоконному лазеру появился источник излучения, открывающий новые возможности в области сварки [4].

1. Blackman D., Dorling V., Howard R. High-speed tandem GVAW for pipeline welding // 4th Intern. pipeline conf., Calgary, Alberta, Canada, 2002. — P. 517–523.
2. Keitel S., Jasnau U., Neubert J. Applications of fiber laser based deep penetration welding in shipbuilding, rail car industries and pipe welding // 4th Intern. symp. on high-power laser and their applications, June 24–26, 2008, St. Petersburg, Russia.
3. Schwalenberg Ch. Technologieentwicklung fuer das MSG-Laserstrahnybridschweißen in Zwangslagen an hochwertigen Rohrleitungswerkstoffen. — Diplomarbeit Hochschule Merseburg, 2008.
4. Keitel S., Neubert J., Strofer M. Laser based girth welding technologies for pipelines — GMAW gets support // IIW-Tagung, June 12–17, 2009, Singapore.

Potential of application of hybrid laser-arc welding for joining pipes in construction of pipelines is considered. It is shown that the combination of hybrid welding with the arc one allows formation of the full-profile section of the weld metal at a pipe wall thickness of 10 mm. Hybrid welding can also be successfully applied to make the root pass in joints on pipes with a root face of 12...15 mm.

Поступила в редакцию 03.11.2010