



## ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ОРБИТАЛЬНОЙ ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

С. ГООК, А. ГУМЕНЮК, М. ЛАММЕРС, М. РЕТМАЙЕР

(Федеральное ведомство по исслед. и испытаниям материалов (БАМ), г. Берлин, Германия)

Приведены результаты разработки и опробации гибридной лазерно-дуговой сварки труб большого диаметра. Обобщены основные результаты исследований, в частности, особенности формирования шва на различных участках кольцевого стыка, показатели механических свойств сварных соединений, перспективы имеющейся техники применительно к строительству магистральных трубопроводов.

*Ключевые слова:* гибридная лазерно-дуговая сварка, орбитальная сварка, трубопроводы высокого давления, оптоволоконные лазеры

Одной из важнейших составных частей мировой энергетической системы является сеть магистральных трубопроводов, при сооружении которых продемонстрировано преимущество ручных и механизированных способов дуговой сварки, в частности, ручной дуговой сварки покрытым электродом, механизированной сварки в защитном газе проволокой сплошного сечения или порошковой проволокой, механизированной двухдуговой тандем-сваркой. Среди недуговых процессов можно выделить способ стыковой сварки оплавлением, который несмотря на простоту принципа не нашел широкого распространения при сооружении современных нефте-, газопроводов [1]. Сварка неповоротных стыков трубопроводов является достаточно трудоемким процессом, от которого в значительной степени зависит темп прокладки магистрали в целом. Применяемые дуговые способы сварки характеризуются относительно низкой скоростью процесса и, например, при строительстве трубопровода диаметром 1229 мм с толщиной стенки 35 мм и более это ограничение представляется довольно ощутимым. Кроме того, нефтегазовая отрасль находится в поиске решений в области внедрения современных высокопрочных конструкционных материалов, что позволило бы уменьшить толщину стенки трубопровода с целью снижения его металлоемкости или увеличить рабочее давление в трубопроводе для более эффективной транспортировки продукта. Вместо стандартных сортов трубопроводной стали классов прочности X60, X70 с пределом текучести до 500 МПа по классификации Американского института нефти в эксплуатацию вводятся стали более высокого класса прочности, такие как X80 или X100, при этом возможно повышение рабо-

чего давления в новых проектируемых трубопроводах с 7...10 до 15...20 МПа. Несмотря на то что повышение прочностных характеристик стали с точки зрения сварочной металлургии приводит к ухудшению ее свариваемости применяемая традиционная дуговая сварка способна обеспечить требуемое качество сварного соединения, а использование полностью автоматизированных технологических процессов решает проблему его воспроизводимости. На выбор тех или иных сварочных процессов при сооружении перспективных трубопроводов из высокопрочной стали первоочередное влияние будут оказывать, по всей видимости, технико-экономические факторы с учетом объемов строительства и гарантий качества строительно-монтажных работ. Данная стратегия неразрывно связана с использованием последних достижений в области сварочных технологий, среди которых наиболее привлекательными на сегодня являются высокопроизводительные комбинированные (гибридные) процессы сварки, основанные на синергетическом эффекте комплексного воздействия на сварной шов лазерного луча и электрической дуги.

Идея использования лучевой сварки для изготовления кольцевых швов трубопроводов не является новой. Так, приблизительно с 2000 г., опубликован ряд работ, в которых обсуждаются возможности использования электронного луча [2], газового CO<sub>2</sub>-лазера [3], а также твердотельного Nd:YAG-лазера [4] для реализации процесса орбитальной сварки. Принципиальная пригодность электронно-лучевой сварки для изготовления однопроводных кольцевых швов продемонстрирована на трубах диаметром 762 мм с толщиной стенки 19 мм. Однако использование указанного способа сварки в условиях монтажа затруднено ввиду определенных технических сложностей его реализации, связанных в основном с необходимостью создания вакуума в зоне сварки и обеспечения защиты от рентгеновского излучения, ге-



нерируемого при попадании электронов на деталь. При использовании лазерного луча максимальная толщина стенки трубы при сварке встык за один проход ограничивается 10 мм, что обусловлено максимальной выходной мощностью задействованных на тот момент лазерных установок (12 кВт для CO<sub>2</sub>-лазера и 4,4 кВт для Nd:YAG-лазера). С появлением высокомошных твердотельных лазеров, таких как оптоволоконный и дисковый, в сварочном производстве стали использовать лазерное излучение мощностью до 20 кВт непрерывного действия с превосходным качеством излучения и в компактном исполнении. Используя указанные преимущества современных лазеров в сочетании с гибридным лазерно-дуговым процессом сварки впервые появилась возможность выполнения однопроходной сварки встык материалов с толщиной стенки до 20 мм [5]. Потенциал современных оптоволоконных лазеров применительно к сварке трубопроводов интенсивно изучается в ряде исследовательских центров Германии, а также в других странах. К наиболее актуальным работам в этой области, результаты которых опубликованы в специальной литературе на протяжении последних двух лет, можно отнести исследование Немецкого исследовательского и образовательного центра сварки в Галле (SLV Halle) [6]. Оптоволоконный лазер мощностью 10 кВт был использован в составе гибридного процесса для соединения сегментов труб с толщиной стенки 10 мм. Гибридную сварку V-образной разделкой кромок с высотой притупления 8 мм осуществляли лазером мощностью 6,5 кВт с максимальной скоростью сварки 0,61 м/мин. При этом облицовочный слой шва выполняли автоматической сваркой в защитном газе. В Центре по исследованию конструкционных материалов (CSM, г. Рим, Италия) кольцевые швы труб диаметром 36 мм с толщиной стенки 16 мм выполняли с применением лазерного и гибридного лазерно-дугового способа сварки в два прохода [7]. В данном случае речь идет о поворотном стыке, сварку которого выполняли в нижнем положении с вращением трубы. В качестве источника лазерного излучения использовали оптоволоконный Yb:SiO<sub>2</sub>-лазер с выходной мощностью 10 кВт (фирма IPG), источником питания дуги служил сварочный инвертор Aristo MIG 500 (фирма ESAB), работающий на максимальном токе 500 А. Для выполнения первого прохода с V-образной разделкой кромок и притуплением 5 мм использовали только лазерную сварку с мощностью установки 10 кВт. При этом обеспечивалось заполнение разделки только половиной толщины стенки трубы. Оставшиеся 8 мм заполняли при втором проходе гибридной лазерно-дуговой сварки. Скорость сварки при выполнении обоих проходов составляла 1 м/мин. В работе [8] приведены результаты полевых испыта-

ний гибридной сварки труб диаметром 610 мм. Твердотельный Nd:YAG-лазер мощностью 4,4 кВт в сочетании с процессом автоматической дуговой сварки плавящимся электродом использовали для выполнения корневого прохода многослойного орбитального шва с U-образной разделкой кромок. При высоте притупления кромок 4 мм реализация полуробитального процесса, начиная с нижнего положения до потолочного, возможна на скорости 1,8 м/мин.

В рамках настоящей работы авторами планировалось опробование оптоволоконного Yb-лазера с выходной мощностью 10 кВт, применяемого для выполнения корневого прохода кольцевых стыков. Однако к моменту публикации был проведен лишь ряд экспериментов на плоских пробах с U-образной разделкой кромок с притуплением от 4 до 7 мм с целью исследования формы проплавления и подбора параметров сварки. В работе [9] обсуждается вариант использования 10 кВт дискового лазера для гибридной сварки труб диаметром 30 мм и более. Представленные результаты касаются сварки в нижнем положении плоских образцов толщиной 10,4 мм из трубной стали класса прочности X80. Заполнение V-образной разделки кромок с притуплением 6 мм и углом раскрытия 60° осуществляли в два прохода: первый — гибридной лазерно-дуговой сваркой с мощностью лазера 9 кВт на скорости 2 м/мин, второй — автоматической дуговой сваркой плавящимся электродом на скорости 1 м/мин. Авторы указанной работы упоминают также об отработке гибридного процесса на кольцевых швах.

Приведенные выше литературные данные в общих чертах дают представление о состоянии работ в области гибридной лазерно-дуговой сварки толстостенных трубопроводов большого диаметра. На их основании можно сделать вывод, что научно обоснованные результаты, необходимые для внедрения гибридных лазерно-дуговых процессов сварки, обеспечивающих высокие характеристики надежности и качества кольцевых стыков труб, все еще отсутствуют. В обсуждаемых результатах в основном речь идет о толщине труб под сварку около 10 мм, для соединения которых применяют технологию многослойной сварки. Потенциал современных лазеров, позволяющий обеспечить более высокую глубину проплавления материала, до настоящего времени не использован в полной мере. Это объясняется отчасти тем, что мощность задействованных лазеров ограничивается 10 кВт, и однопроходная сварка труб толщиной 16 мм и более, что было бы интересно с точки зрения экономической эффективности, не возможна. Кроме того, отсутствуют количественные результаты исследования надежности сварных соединений труб, выполненных гибридной лазерно-дуговой сваркой, не изучены



в достаточной степени причины образования горячих трещин и не выработаны рекомендации по их предупреждению.

БАМ совместно с рядом фирм представителей индустрии и при поддержке федерального Министерства образования и исследований Германии проводит изучение процесса орбитальной гибридной сварки с использованием оптоволоконного лазера мощностью 20 кВт. Применение лазерных систем мощностью 15 кВт и выше при строительстве толстостенных трубопроводов большого диаметра наиболее привлекательно, поскольку при указанной мощности лазеров обеспечивается такая глубина проплавления материала, при которой возможно получение значительного экономического эффекта от внедрения этой техники. Это связано, в первую очередь, с модификацией разделки под сварку таким образом, что количество проходов, а соответственно и присадочного материала, необходимого для заполнения разделки, может быть значительно снижено. Сравнение показало, что расход сварочной проволоки при сварке стыков труб диаметром 1020 мм с толщиной стенки 20 мм может быть сокращен в 4 раза при применении гибридного лазерно-дугового процесса по сравнению с двухдуговой тандем-сваркой в защитных газах, которая на сегодня считается одним из самых производительных способов сварки трубопроводов, и более чем в 10 раз по сравнению с ручной дуговой сваркой. Более высокая по сравнению с традиционными способами сварки скорость гибридного лазерно-дугового процесса позволяет сократить время на сварку одного стыка и тем самым способствует более высокому темпу прокладки магистралей. Потребление энергии при гибридном способе сварки, несмотря на сравнительно низкий КПД оптоволоконных лазеров (около 30 %), сравнимо с тандемным дуговым процессом сварки и на порядок меньше, чем при ручной дуговой сварке. Некоторые показатели рассматриваемых способов сварки приведены в табл. 1.

На основании приведенных данных следует, что гибридная лазерно-дуговая сварка является перспективной ресурсосберегающей технологией.

**Т а б л и ц а 1.** Сравнение способов сварки трубопроводов на примере выполнения одного стыка труб диаметром 40 мм с толщиной стенки 20 мм

Способ сварки	Расход проволоки, кг/ч	Время сварки, мин	Расход энергии, кВт
Ручная дуговая плавающимся электродом	6,40	190	30,0
Двухдуговая тандемная в защитных газах	1,90	12	2,7
Гибридная лазерно-дуговая	0,33...0,44	1,5	2,2

Однако необходимым условием успешного внедрения в производство этой технологии является ее соответствие требованиям норм качества в отношении допустимых дефектов сварных швов, а также обеспечение требуемых механико-технологических свойств сварных соединений, оговоренных соответствующими нормативными документами. Одной из целей исследований, проводимых в БАМ, является ответ на вопрос, обеспечиваются ли требования, предъявляемые к сварным соединениям трубопроводов, которые получены гибридной лазерно-дуговой сваркой.

В настоящей работе основное внимание уделено двум аспектам орбитальной сварки толстостенных труб большого диаметра. Рассматривается принципиальная возможность использования оптоволоконного лазера мощностью 20 кВт для решения подобных задач и особенности указанных способов сварки в различных положениях. При этом проанализированы механико-технологические свойства полученных сварных соединений и предложены способы влияния на их показатели.

**Оборудование и материалы.** Источником лазерного излучения служил волоконный лазер YLR-20000 мощностью 20 кВт (фирма IPG), а источником питания дуги — автомат для импульсно-дуговой сварки типа GLC 603 Quinto (фирма «Cloos»), обеспечивающий максимальный ток сварки 600 А. Устройство для орбитальной лазерно-дуговой сварки трубопроводов (рис. 1), с помощью которого возможна сварка кольцевых стыков диаметром от 914 до 1070 мм, сконструировано и предоставлено для сварочных испытаний фирмой «Vietz GmbH», партнером БАМ в настоящем проекте. Основными элементами устройства являются направляющее кольцо 1 и орбитальная тележка 4, перемещение которой по ок-



Рис. 1. Устройство для орбитальной лазерно-дуговой сварки



Таблица 2. Химический состав (мас. %) исследуемых материалов

Класс прочности стали	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Nb	Cu	Al	Mo	V	Ti	Fe
X56	0,07	0,03	1,33	0,008	0,001	0,03	0,04	0,05	0,02	0,04	0,02	<0,01	0,02	Осн.
X65	0,09	0,36	1,57	0,011	0,001	0,03	0,05	0,04	0,02	0,04	0,01	<0,01	0,02	»

ружности кольца реализуется через зубчатое зацепление. С помощью трех дополнительных электроприводных осей осуществляется корректировка положения лазерного луча по отношению к стыку во время сварки. Работой устройства в целом управляет система числового программного управления «Siemens SINUMERIK», которая обеспечивает точность позиционирования  $\pm 0,1$  мм. Гибридная сварочная головка, состоящая из оптической головки фирмы «HighYag» 3 с фокусным расстоянием 300 мм и сварочной горелки для сварки в защитных газах 2 закреплена на орбитальной тележке. Для проведения сварочных экспериментов в условиях лаборатории конструкция устройства для орбитальной сварки адаптирована под сварку трубных колец 5, которые были фиксированы в центре направляющего кольца. Транспортировку лазерного излучения от лазера к оптике осуществляли с помощью оптического волокна с диаметром ядра 200 мкм. Диаметр лазерного луча в фокальной плоскости составлял 0,5 мм. Ряд экспериментов проводили с использованием сканирующей оптики. В этом случае диаметр фокусного пятна составлял 0,42 мм. В качестве проб под сварку использовали кольца шириной 120 мм, вырезанные из труб диаметром 914 мм с толщиной стенок 15 и 16 мм. Трубы изготовлены из сталей классов прочности X56 и X65 согласно классификации API 5L. Примерным аналогом настоящих сталей являются российские стали K52 и K56, которые соответствуют сталям L360MB и L450MB (EN 10208–2). Исследуемые материалы характеризуются низким (до 0,09 % C) содержанием углерода. Содержание серы и фосфора находится также в допустимых для лазерного сварочного процесса пределах [10]. Химический состав исследуемых материалов приведен в табл. 2.

Высокие значения предела текучести сталей классов прочности X56 и X65 в сочетании с хорошими показателями ударной вязкости достигаются за счет контролируемой прокатки листа (штрипса). Механические свойства исследуемых сталей приведены в табл. 3.

В качестве присадочного материала использовали сварочную проволоку G3Si1 по DIN EN 440 диаметром 1,2 мм. В качестве защитного газа использовали смесь газов ARCAL 21, состоящую из 92 % Ar и 8 % диоксида углерода (M21 согласно DIN EN 439). Для защиты корня шва применяли аргон (Ar 4.6). Процесс гибридной сварки

реализовали впереди идущей дугой с заглуплением фокуса луча  $\Delta z$  на 4 мм и углом наклона горелки к оси луча лазера  $25^\circ$ . Расстояние между точками выхода сварочной проволоки и лазерного луча на поверхности детали составляло от 3 до 4 мм. Перед сваркой два кольца прихватывали изнутри шестью, равномерно распределенными по периметру окружности скобами. Сварку осуществляли встык без разделки кромок. Максимальный зазор на некоторых участках стыка под сварку составлял 0,2 мм, а максимальное смещение кромок находилось в пределах 0,5...1,0 мм.

**Полуорбитальная сварка кольцевых стыков.** Сварку колец выполняли на спуск (с нижнего положения до потолочного) таким образом, чтобы кольцевой шов был сварен в два этапа с двумя замыкающими участками. Здесь, на наш взгляд, целесообразно ввести понятие полуорбитального процесса — а для обозначения отдельных пространственных положений сварки использовать изменение угла наклона касательной к окружности относительно исходного, нижнего положения. Таким образом, началу сварки соответствовала позиция угол 0 (нижнее положение), а окончанию процесса — позиция угол  $180^\circ$  (потолочное положение). При сварке второго полукольца координаты точек старта и окончания процесса были смещены вдоль сварного шва для обеспечения его замыкания. Для выполнения одного полуорбитального шва потребовалось пять наборов сварочных параметров  $P$ . Все операции, связанные с плавным изменением и контролем этих параметров, производили с помощью цифровой системы управления «Siemens SINUMERIK». Рис. 2 поясняет технику сварки полукольца, там же показаны символы прочности параметров процесса  $P$  для различных положений сварки.

Сварку выполняли на постоянной для всех положений мощности лазера  $P_L = 19$  кВт и средней

Таблица 3. Механические свойства сталей классов X56 и X65 (согласно классификации API 5L)\*

Класс прочности стали	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %	Работа удара при $68 \text{ Дж/см}^2$ ( $T = 20^\circ \text{C}$ )
X56	386	489	25,5	68
X65	450	530	23,5	68

\* Даны минимальные значения параметров.



скорости  $v_s = 2$  м/мин. В зависимости от пространственного положения процесса сварки осуществляли незначительную корректировку скорости в пределах  $\pm 0,2$  м/мин относительно ее среднего значения. На формирование наружной поверхности шва в большей степени оказывал влияние объем сварочной ванны, образованный плавлением сварочной проволоки. Требуемую форму проплавления обеспечивали за счет адаптации скорости подачи сварочной проволоки  $v_d$  при переходе из одного положения сварки в другое. Так, для нижнего положения характерна высокая (около 14 м/мин) скорость подачи сварочной проволоки  $v_d$ . По мере продвижения к вертикальному положению  $90^\circ$  она плавно уменьшается до 9 м/мин. В потолочном положении качественное формирование шва возможно при таком объеме расплавленного металла, при котором не происходит его вытекания из сварочной ванны. Максимальная скорость подачи сварочной проволоки для потолочного положения была ограничена (6 м/мин). Дополнительно к адаптации скорости подачи сварочной проволоки при смене пространственных положений сварки осуществляют корректировку длины дуги  $L_{LB}$ , которую изменяют в пределах от +5 до -12 % по отношению к ее номинальному значению при заданных параметрах сварки. Так, в потолочном положении сварку выполняли короткой дугой, с коэффициентом коррекции -12 %. Силы газо- и электродинамического воздействия дуги на металл сварочной ванны в этом случае оказывали положительный поддерживающий эффект, что приводило в итоге к формированию качественного равномерного валика. На рис. 3 показаны макрошлифы и внешний вид некоторых характерных участков полуорбитальных швов.

Исходя из характера протекания процесса, можно заключить, что при корректно выставленных основных сварочных параметрах (рис. 2) формирование шва в положениях, начиная от нижнего (угол  $0^\circ$ ) и до вертикального (угол  $90^\circ$ ), происходит достаточно устойчиво. Сварку выполняли на повышенной скорости 2,2 м/мин, при которой не происходит провисание корня шва и обеспечивается полное его проплавление. Швы имеют благоприятную форму поперечного сечения с плавным переходом к основному металлу и стабильное формирование корня с малым количеством брызг. Однако визуальная оценка качества формирования шва показала, что для участка стыка от  $50$  до  $80^\circ$  характерно некоторое провисание лицевой стороны сварного шва. Несмотря на то что провисание незначительное, по всей видимости, потребуется наложение облицовочного слоя для создания усиления сварного шва на данном участке.

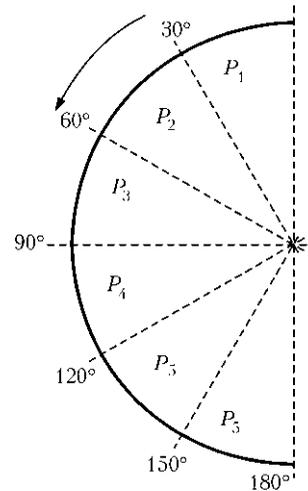


Рис. 2. Схема полуорбитальной лазерно-дуговой сварки кольцевого стыка диаметром 914 мм с толщиной стенки 16 мм: постоянные параметры:  $P_L = 19$  кВт;  $\Delta z = -4$  мм; изменяемые параметры:  $P_1$  ( $v_d = 14$  м/мин,  $L_{LB} = +5\%$ ,  $v_s = 2,2$  м/мин);  $P_2$  ( $v_d = 12$  м/мин,  $L_{LB} = 0\%$ ,  $v_s = 2,2$  м/мин);  $P_3$  ( $v_d = 9$  м/мин,  $L_{LB} = -5\%$ ,  $v_s = 2,2$  м/мин);  $P_4$  ( $v_d = 7$  м/мин,  $L_{LB} = -10\%$ ,  $v_s = 1,9$  м/мин);  $P_5$  ( $v_d = 6$  м/мин,  $L_{LB} = -12\%$ ,  $v_s = 1,7$  м/мин)

При переходе к позиции  $90^\circ$  отмечена высокая чувствительность процесса к объему сварочной ванны. Уже при незначительном превышении некоторого критического значения скорости подачи сварочной проволоки (9 м/мин при угле  $90^\circ$ ) происходит «размазывание» металла по обеим сторонам шва, процесс протекает с повышенным брызгообразованием, на обратной стороне шва возможны наплывы металла и частичный непровар.

По мере продвижения к позиции  $120^\circ$  наряду с уменьшением скорости подачи сварочной проволоки до 7 м/мин снижается и погонная энергия гибридного процесса. При этом вероятность непровара корня шва увеличивается. Полное проплавление с удовлетворительным формированием корня в данной позиции достигнуто при одновременном снижении скорости сварки до 1,9 м/мин.

При сварке в потолочном положении, начиная приблизительно со  $120$  и до  $180^\circ$  качественный валик с небольшим усилением формируется при скорости процесса 1,7 м/мин. Наиболее сложной задачей на данном участке стыка оказалось получение приемлемого качества формирования корня. В данной позиции критической проблемой являлось отсутствие сплавления на обратной, обращенной кверху стороне шва. Этот дефект был вызван, с одной стороны, недостатком жидкого металла в корневой зоне шва по причине его провисания под действием силы тяжести и разбрызгивания, с другой определенную сложность представляла высокая чувствительность процесса к точности позиционирования сварочной головки относительно стыка. Так, смещение луча лазера на 0,3 мм приводило уже к одностороннему оплавлению кромок и, как следствие, к отсутствию сплавления в корневой зоне гибридного шва.



Варьирование основных сварочных параметров эффективного воздействия на настоящий дефект не оказывало (постоянные параметры:  $P_L = 19$  кВт,  $\Delta z = -4$  мм).

Обнадеживающие результаты получены при применении сканирующей оптики фирмы «HighYag», которая обеспечивает возможность линейной осцилляции лазерного луча в направлении, перпендикулярном направлению сварки с максимальной амплитудой 13 мм и частотой до 1 кГц. Сканирующую оптику применяли для стабилизации процесса при осцилляции лазерного луча, а также увеличения поперечного сечения шва, за счет чего обеспечивается лучший охват кромок и их сплавление. Хорошо воспроизводимые результаты с удовлетворительным качеством формирования корня шва в потолочном положении получены при амплитуде 0,7 мм с частотой сканирования 200 Гц. При данных настройках сканера полное проплавление обеспечивалось без адаптации других сварочных параметров. Для улучшения качества формирования корня шва использовали защитный газ аргон, который подавали с обратной стороны шва с помощью специально изготовленной ванны, накладываемой на

стык и повторяющей внутренний контур свариваемых деталей. Макрошлиф и внешний вид потолочного шва выполненного с использованием сканирующей оптики и формирующего газа, показаны на рис. 4.

Возможности сканирующей оптики были исследованы нами, в том числе при определении максимального зазора в стыке, при котором обеспечивается надежное сплавление кромок [11]. В результате проведения серии сварочных экспериментов на плоских образцах из стали класса прочности Х65 толщиной 16 мм установлено, что стабильный процесс без дефектов сплавления реализуется при максимальном зазоре 0,7 мм, при сварке с использованием обычной оптики зазор составляет примерно 0,3 мм. Максимально допустимое смещение кромок составляет около 2 мм. Приведенные допуски относятся только к нижнему положению сварки, для установления значений допусков в других пространственных положениях сварки требуется проведение ряда экспериментов.

С целью оценки возможности исправления дефектов сварного шва, выполненного способом гибридной сварки, был протестирован ряд ремонтных швов. Испытания проводили как в нижнем положении сварки, так и в вертикальном на участке от 60 до 70°. Участки кольцевого стыка с дефектами типа несплавление корня проваривали гибридной сваркой поверх имеющегося дефектного шва с применением формирующего газа. Для всех выполненных ремонтных швов было харак-

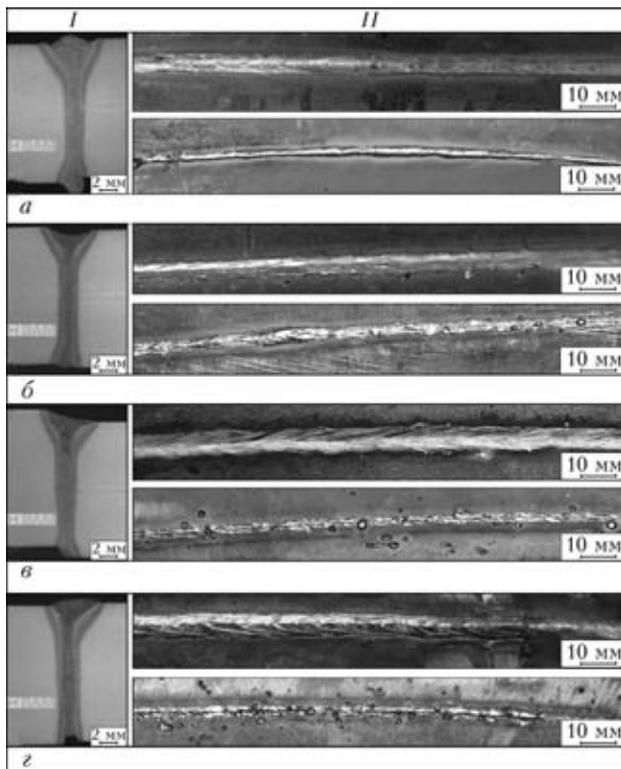


Рис. 3. Макрошлифы (I) и внешний вид гибридного лазерно-дугового шва (II), выполненного на трубе из стали класса прочности Х65, имеющей внешний диаметр 914 мм и толщину стенки 16 мм: а — угол 0° ( $v_d = 14$  м/мин,  $v_s = 2,2$  м/мин,  $L_{LB} = +5\%$ ,  $I_d = 364$  А,  $U_d = 35,5$  В); б — угол 60° ( $v_d = 10$  м/мин,  $v_s = 2,2$  м/мин,  $L_{LB} = -5\%$ ,  $I_d = 245$  А,  $U_d = 28,9$  В); в — угол 120° ( $v_d = 7$  м/мин,  $v_s = 1,9$  м/мин,  $L_{LB} = -10\%$ ,  $I_d = 180$  А,  $U_d = 22,0$  В); г — угол 180° ( $v_d = 6$  м/мин,  $v_s = 1,8$  м/мин,  $L_{LB} = -12\%$ ,  $I_d = 174$  А,  $U_d = 21,5$  В)

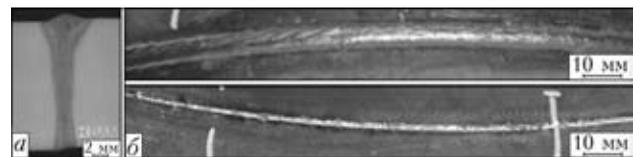


Рис. 4. Макрошлиф (а) и внешний вид (б) потолочного гибридного лазерно-дугового шва, выполненного с использованием сканирующей оптики и формирующего газа:  $P_L = 19$  кВт;  $v_d = 6$  м/мин;  $v_s = 1,8$  м/мин;  $L_{LB} = -12\%$ ;  $I_d = 174$  А;  $U_d = 21,5$  В

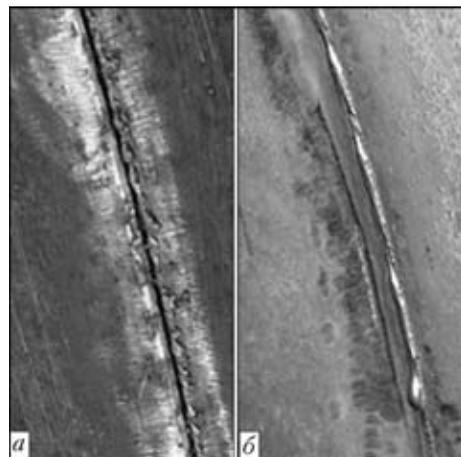


Рис. 5. Дефект корня шва (а) и ремонтный шов (б)



Рис. 6. Образец, выполненный полуорбитальной гибридной сваркой

терно формирование корня удовлетворительного качества. Один из примеров такого шва, выполненного в вертикальном положении, показан на рис. 5. Проведенные испытания показали потенциальную возможность исправления дефектных участков швов при повторном проходе. Систематические исследования в этом направлении, в том числе в потолочном положении, к моменту написания статьи проведены не были.

Накопленные в результате исследовательской работы знания и опыт позволили нам изготовить серию образцов (рис. 6), которые были представлены на международной отраслевой выставке-ярмарке «Schweißen & Schneiden 2010», г. Эссен, Германия.

**Внутренние дефекты и механические свойства сварных соединений.** Для оценки качества и механических свойств изготовленных швов были привлечены методы как разрушающего, так и неразрушающего контроля. Металлографические и рентгенографические исследования сварных соединений из стали класса прочности X65 показали наличие протяженных кристаллизационных трещин, расположенных по центральной линии шва параллельно свариваемым кромкам,

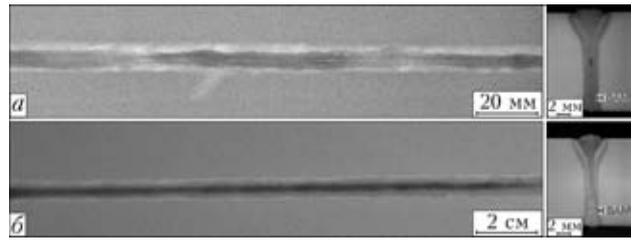


Рис. 7. Рентгенографические снимки и макрошлифы гибридных сварных швов, выполненных на сталях класса прочности X65 (а) и X56 (б)

по глубине залегающих примерно в середине толщины стенки трубы (рис. 7, а). В сварных соединениях из стали класса прочности X56 указанные дефекты обнаружены не были (рис. 7, б).

Исследуемые стали отличаются схожими химическими составами (см. табл. 2). Гибридную сварку колец из сталей обоих классов прочности производили на одинаковых режимах. В числе возможных причин повышенной чувствительности стали класса прочности X65 к образованию кристаллизационных (горячих) трещин следует отметить влияние зональной ликвации, а также свойства структуры металла труб, обусловленных режимами термомеханической прокатки. Структура стали класса прочности X65 в отличие от X56 характеризуется наличием перлитной полосчатости (рис. 8), что приводит к высокой анизотропии механических свойств проката. Вопрос о влиянии ее структуры на образование горячих трещин при лазерной и лазерно-дуговой сварке исследуется нами в настоящее время.

На кольцевых пробах из стали класса прочности X65 с содержанием углерода 0,09 мас. % проведены измерения микротвердости металла шва и околошовной зоны в соответствии с DIN EN 1043–2. Определено, что максимальные значения микротвердости не отвечали требованиям указанного нормативного документа, в связи с чем принято решение об использовании предварительного подогрева для обеспечения требуемых значений микротвердости. Сварочные испытания с подогревом проведены на сегментах колец в нижнем положении. Нагрев деталей перед сваркой

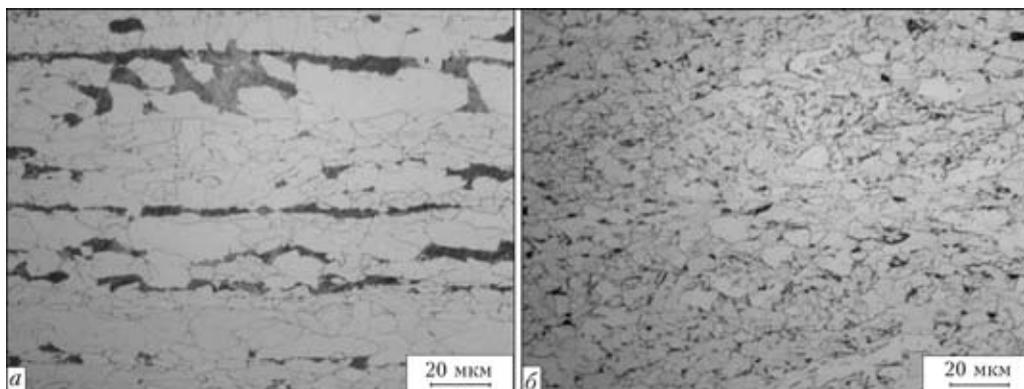


Рис. 8. Микроструктуры основного металла: а — сталь класса прочности X65; б — X56

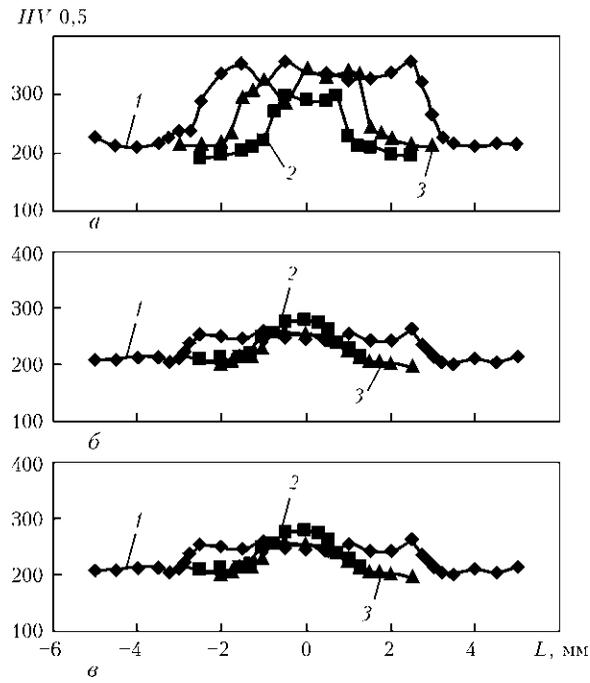


Рис. 9. Распределение микротвердости поперек сварного соединения, выполненного без подогрева (а), с подогревом до 200 (б) и 300 °С (в): 1–3 — соответственно верхняя, центральная и нижняя (корневая) зоны шва; L — расстояние от центра шва

осуществляли с помощью нагревателей сопротивления до температуры от 150 до 350 °С с шагом 50 °С. Термоэлементы типа К (никельхром–никель), зафиксированные на обратной стороне пробы на расстоянии 0,7 мм от стыка, использовали для контроля температуры подогрева, а также для измерения температурного цикла сварки. Результаты измерения микротвердости металла шва и околошовной зоны при сварке с подогревом и без подогрева приведены на рис. 9.

Установлено, что с повышением температуры подогрева процесс сварки реализуют с меньшей мощностью лазерного излучения, чем та, которая необходима при сварке «холодных» проб. Мощность лазера при температуре предварительного подогрева 350 °С может быть снижена до 17 кВт. Измеренное в зоне термического влияния время охлаждения  $t_{8/5}$  (в интервале температур от 800 до 500 °С) составляет около 1 с при сварке без подогрева. С подогревом до 350 °С время  $t_{8/5}$  увеличивается до 16 с. Максимальная микротвердость металла шва при этом находится на уровне основного металла (HV 220). Достигнутые с применением предварительного подогрева значения микротвердости соответствуют требованиям действующих норм в области производства труб из материалов, не предназначенных для работы в кислой среде, например DNV-OS-F101.

При использовании нагревателей сопротивления при подогреве полной окружности стыка необходимо учитывать, что это довольно длительная технологическая операция, которая может нега-

тивно сказаться на темпе прокладки трубопровода. В качестве альтернативы нами рассматривается локальный подогрев кромок стыка, например с помощью индуктора, перемещаемого вместе со сварочной головкой. В зависимости от конфигурации и расположения индуктора дополнительное тепловложение в материал возможно как непосредственно перед сваркой, так и после нее. При этом мощность индуктора должна обеспечивать прогрев свариваемого материала на всю толщину при заданной скорости процесса сварки.

На примере труб диаметром 914 мм с толщиной стенки 16 мм успешно продемонстрирована сварка кольцевого стыка в два полуорбитальных прохода на спуск со средней скоростью 2 м/мин при мощности лазера 19 кВт. Потолочное положение сварки (участок от 150 до 180°) является наиболее сложным с точки зрения обеспечения качественного формирования корня.

Адаптация скорости подачи сварочной проволоки, скорости сварки, а также применение формирующего газа заметно улучшают качество корня в потолочном положении сварки. Сканирующая оптика зарекомендовала себя как эффективный инструмент, позволяющий расширить допуски на зазоры в стыке, а также компенсировать незначительные ошибки позиционирования сварочной головки относительно стыка. Установленный для свариваемой толщины 16 мм зазор, при котором еще возможен стабильный процесс без дефектов сплавления, составляет 0,7 мм, при обычной сварке он составляет 0,3 мм. С применением предварительного подогрева достигнуто увеличение времени охлаждения  $t_{8/5}$  с 1 до 16 с, что способствовало значительному снижению микротвердости в зоне термического влияния.

*Настоящие исследования проводятся в рамках проекта MNPQ FK19/07 при финансовой поддержке федерального Министерства образования и исследований Германии. Авторы выражают благодарность производственным партнерам, фирмам «Vietz GmbH» и «HighYag» за плодотворное сотрудничество и предоставление оборудования для проведения экспериментов.*

1. Widgery D. J. Mechanised welding of pipelines // Svetsaren — the ESAB welding and cutting journal. — 2005. — № 1. — P. 23–26.
2. Study on all position electron beam welding of large diameter pipeline joints (Rep. 1, 2) / S. Koga et al. // Welding Intern. — 2001. — № 15. — P. 28–33, 92–99.
3. Laser orbital welding applied to offshore pipe line construction / Y. Gainand et al. // Pipeline Techn. Elsevier Science. — 2000. — II. — P. 327–343.
4. Development of an all-position YAG laser butt welding process with addition of filler wire / S. Fujinaga et al. // Welding J. — 2005. — № 19. — P. 441–446.
5. Laser-hybrid welding of thick plates up to 32 mm using a 20 kW fibre laser / M. Rethmeier et al. // Trans. Jap. Weld. Res. Instit. — 2009. — 27, № 2. — P. 74–79.



6. *Influence of tolerances to weld formation and quality of laser-GMA-hybrid girth welded pipe joints* / J. Neubert et al. — IV-1003-09.
7. *Circumferential welding of gas pipeline pipes using hybrid technology with fibre-delivered LASER beam* / M. Fersini et al. // *Welding Intern.* — 2009. — 23, № 6. — P. 450-459.
8. *Hybrid laser/GAS metal arc welding of high strength steel gas transmission pipelines* / D. Harris Ian et al. // *Proc. of IPC2008 7th Intern. pipeline conf.*, Sept. 29– Oct. 3, 2008, Calgary, Alberta, Canada. — IPC2008-64129.
9. *Development of a hybrid laser arc welding system for pipeline construction* / D. Begg et al. // *Ibid.* — IPC2008-64599.
10. *Guidelines for approval of CO<sub>2</sub>-laser welding in ship hull construction classification societies unified*, 1996.
11. *High power fibre laser welding for pipeline applications* / A. Gumenyuk et al. // *Proc. of LAMP2009 5th congress on laser advanced materials processing*, July 2009, Kobe.

The results of development and testing of hybrid laser arc welding of large diameter pipes were given. The main results of carried out research work were generalized, in particular, peculiarities of weld formation in different regions of circumferential joints were discussed, mechanical properties of performed welds given and perspectives of existing technique applicable to construction of main pipelines evaluated.

Поступила в редакцию 05.05.2010



## ПОРОШКОВЫЕ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ И УПРОЧНЯЮЩЕЙ НАПЛАВКИ МОЛОТКОВ РОТОРНЫХ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ

В ряду дробильно-помольного оборудования заметное место занимают роторные дробилки. Они относятся к оборудованию ударного действия, с помощью которого процесс измельчения материала осуществляется под воздействием механического удара. Такие нагрузки могут возникнуть при взаимном столкновении частиц измельчаемого материала, их столкновении с неподвижной поверхностью (корпуса, решетки и др.), столкновении материала и движущихся рабочих органов машины.

Дробилки указанного типа просты по конструкции, компактны, имеют небольшую массу, высокие производительность и степень измельчения ( $i = 15...20$ , а иногда и до 50). К дробилкам ударного действия относятся роторная и молотковая дробилки. Основным различием между ними является способ крепления рабочего органа. В роторных дробилках закреплены жестко или практически жестко, а в молотковых — ротор состоит из насаженных на вал отдельных дисков и отделенных друг от друга дистанционными шайбами. Через расположенные по окружности отверстия в дисках проходят оси насаженных шарнирно молотков, которые при вращении вала измельчают материал. Гибкая подвеска молотков на роторе позволяет пропускать твердые, инородные предметы без вреда для дробильных элементов.

Дробилки применяются для измельчения малоабразивных материалов средней прочности и мягких материалов, а также на угольных электростанциях, предприятиях добывающей и металлургической промышленности для дробления угля, руды, известняков, мела, гипса, минералов и солей.

В зависимости от размера кусков дробимого материала и требуемой степени его измельчения применяют молотки различной формы и массы (от 3,5 до 180 кг), которые изготавливают литыми из низколегированных сталей, стали Гадфильда или стальными коваными. Как правило, для обеспечения непрерывной работы для одной дробилки имеется несколько комплектов молотков, которые восстанавливаются по мере износа и замены.

Как показал опрос значительного количества предприятий, имеющих в своем арсенале подобные дробилки, в настоящее время их восстановительный ремонт выполняется дуговой наплавкой с использованием электродов Т-590 и Т-620.

Для выполнения упрочняющей и ремонтной наплавки молотков ООО «ТМ ВЕЛТЕК» разработаны, опробованы на ряде предприятий и предлагаются для широкого применения самозащитные порошковые проволоки.

Для ремонта молотков из низколегированных сталей рекомендуется применение проволоки ВЕЛТЕК Н290 (послой) + проволока ВЕЛТЕК Н625 (упрочняющий слой), а молотков из стали Гадфильда — проволоки ВЕЛТЕК Н216 + ВЕЛТЕК Н625.

Проволоки изготавливаются диаметром 2,0 мм. Восстановление геометрии изделий выполняется ничтожными швами по шаблону. Принудительное формирование наплавляемого металла не требуется.



Внешний вид восстановленного молотка

В. Н. Упырь, инж.