

УДК 621.791.72:621.375.826

ТЕХНОЛОГИИ ГИБРИДНОЙ ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ КОЛЬЦЕВЫХ ШВОВ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

С. КАЙТЕЛЬ, Я. НОЙБЕРТ

Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Halle GmbH, Köthener Str. 33a, 06118 Halle (S.), Germany.
E-mail: keitel@slv-halle.de

Целью исследований гибридного лазерно-дугового процесса являлось накопление знаний о данном процессе применительно к получению трубных соединений. Рассмотрены многие аспекты, такие как допуски, влияние окружающей среды, мобильность оборудования и техника сварки в смещенном положении. Основное внимание уделено исследованию эффекта лазерной сварки с большой глубиной проплавления для получения высококачественного соединения в корневом проходе при высоте притупления 6...10 мм. Проводится сравнение различных положений луча лазера и дуги, которые могут применяться при гибридной сварке с различными типами подготовки под сварку. Техника получения трубных соединений заключалась в сварке двух вертикальных швов в положении сверху вниз, что является обычной практикой при строительстве трубопроводов и значительно сокращает степень свободы при расположении луча лазера и дуги, необходимой для достижения технического оптимума при формировании соединений. Для получения замкнутого профиля шва в соединениях толщиной до 12 мм валик шва растягивают посредством продолжения движения дуговой горелки, что позволяет заваривать первый проход, используя гибридную сварку, а перекрывающий проход – сварку МАГ за один цикл сварки. Кроме того, тот завершающий процесс оказывает положительное влияние на механические свойства сварного шва. Библиогр. 3, табл. 4, рис. 8.

Ключевые слова: гибридная лазерно-дуговая сварка, трубное соединение, кольцевые швы, оборудование, параметры процесса сварки, экспериментальная установка

Для соединения труб нефте- и газопроводов большого диаметра в течение многих лет применялись проверенные и опробованные способы дуговой сварки. Используют различные варианты этих способов сварки в зависимости от длины трубопровода, толщины стенки отдельных труб и материала, из которого они изготовлены. Диапазон их применения достаточно широк — от ручной дуговой сварки штучными электродами до орбитальной дуговой сварки МИГ/МАГ, полностью механизированного процесса, где используют электроприводные системы и зажимные кольца по всей окружности трубы. Если позволяет длина трубопровода и профиль местности, одновременно может быть задействовано несколько орбитальных устройств.

При этом каждая отдельная станция используется для сварки одного или двух слоев, и затем перемещается на следующий стык для заварки шва. Такие производственные агрегаты могут иметь несколько сварочных головок, что свидетельствует о высоком уровне развития оборудования и сварочной технологии. Однако эти технологии высокочрезвычайно затратны (рис. 1). Дальнейшее их усовершенствование проблематично, поскольку дуговые процессы достигли своего предела с точки зрения производительности процесса плавления и скоро-

сти сварки. Значительного улучшения в этой области не даст даже оптимизация оборудования.

По мнению авторов разработки в области повышения эффективности сварочных процессов следует проводить по следующим направлениям:

уменьшение количества проходов при стабильном и высоком качестве шва;

уменьшение количества сварочных станций и, следовательно, расходов на оборудование и персонал.

Сварочные процессы на базе лазера требуют, с одной стороны, определенных технологий и, с другой стороны — необходимого для этого



Рис. 1. Монтажная площадка для прокладки трубопровода



оборудования. Ниже авторы обосновывают эти требования.

Гибридная лазерно-дуговая сварка кольцевых швов в условиях, подобных используемым на стройплощадках. Оборудование. Для проверки принципиальной возможности использования гибридного лазерно-дугового процесса для сварки кольцевых соединений применяли обычные технологии. Исследования проводили с помощью промышленной системы для сварки труб компании «Gullco».

Данная система оснащена трактором на кольцевой направляющей для проведения орбитальной сварки, а также контактной системой слежения за швом и системой сканирования шва с двумя осями перемещения для поперечного движения и установки по высоте технологических компонентов относительно разделки. Контактный датчик, определяющий процесс сварки, расположен впереди по направлению движения.

Выполнена настройка сварочной головки по осям свободы для регулирования по высоте с применением различных элементов жесткости. Головка для гибридной сварки имеет дополнительные степени свободы для обеспечения возможных последовательных перемещений луча лазера и дуги МАГ (табл. 1).

Как показано в табл. 1, для упрощения полагают что или лазер, или дуга находятся в нейтральном положении.

В качестве источников лазерного излучения были выбраны две различные системы оптоволоконного

Таблица 1. Варианты расположения луча лазера и дуги МАГ

Номер варианта	Основной процесс (нейтральное положение)	Второй процесс (положение)	Схема процесса
1	Луч лазера	Горелка впереди (наклон назад)	
2		Горелка позади (наклон вперед)	
3	Дуга	Лазерный луч впереди (наклон назад)	
4		Лазерный луч позади (наклон вперед)	

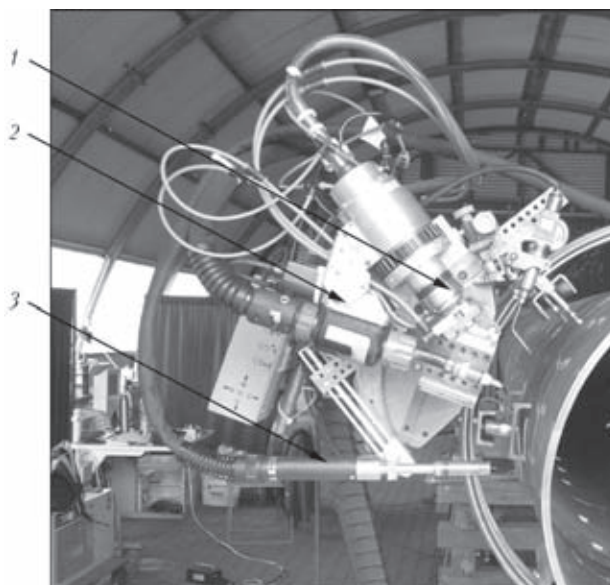


Рис. 2. Сварочная головка с гибридной оснасткой для сварки корневого шва и дуговая горелка для заполнения разделки: 1 — лазерная оптика; 2 — гибридная дуга; 3 — сварка МАГ верхнего слоя

лазера. На первом этапе исследований при высоте притупления до 6 мм, применяли лазер с выходной мощностью 4,5 кВт, а на втором (при высоте притупления 8 мм) — мобильный лазер SLV Mecklenburg-Vorpommern мощностью 10 кВт.

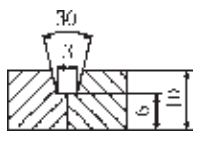

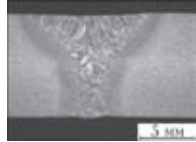
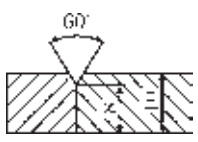
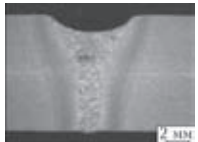
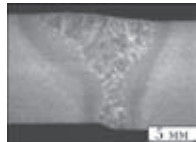
Оптоволоконный лазер мощностью 4,5 кВт, выпущенный в 2003 г., был одним из первых источников излучения для сварки данного класса мощности, зарекомендовавший себя как стабильный источник. На рис. 2 показана сварочная головка, оснащенная устройствами для гибридной сварки и встроенной второй дуговой горелкой для сварки перекрывающего прохода одним вертикальным движением сверху вниз.

Сварку выполняли на отрезках трубы длиной до 6 м. В этом случае допуски были большими по сравнению с соединением калиброванных труб.



Рис. 3. Сварка труб с помощью установки для испытаний

Таблица 2. Макрошлифы соединений, полученных гибридной сваркой

Разделка кромок	Первый слой	Замкнутый профиль шва
Выходная мощность лазера 4,6 кВт		
		
Выходная мощность лазера 6,5 кВт		
		

На рис. 3 показана установка для испытаний в сборе с компонентами.

Проведение технологических испытаний и их результаты. Испытания проводили с использованием двух источников лазерного излучения разной выходной мощности. При этом первую серию испытаний для определения основных параметров гибридной дуги и чувствительности к допускам гибридного процесса при постоянно меняющемся положении сварки по окружности трубы проводили с использованием лазера мощностью 4,5 кВт. Второй этап испытаний проводили для оценки потенциала гибридного процесса при более высоких параметрах лазера (10 кВт) и одновременном увеличении высоты притупления в корневом шве от 6 до 8 мм.

Далее рассмотрены результаты исследований на макрошлифах первого слоя при гибридной сварке и всего профиля замкнутого шва, полученного с использованием дополнительной дуги, при различных вариантах разделки кромок под сварку и выходной мощности лазера 4,6 и 6,5 кВт (табл. 2).

Установлено, что при измеренных допусках на трубных соединениях и рекомендуемых параметрах сварки можно получить положительные результаты при различных допусках параметров процесса.

Данные исследования завершали определением распределения твердости, в частности, в корневом шве, поскольку именно там под воздействием луча лазера в ЗТВ наблюдается повышенная твердость. В процессе исследований заварку корневого шва без перекрывающего прохода сравнивали со сваркой шва замкнутого профиля с использованием вспомогательной дуги. Результаты этих исследований показаны на рис. 4.

Наиболее важной целью исследований являлось определение стандартных допусков при строительстве трубопроводов и определения их влияния на процесс гибридной сварки. В процес-

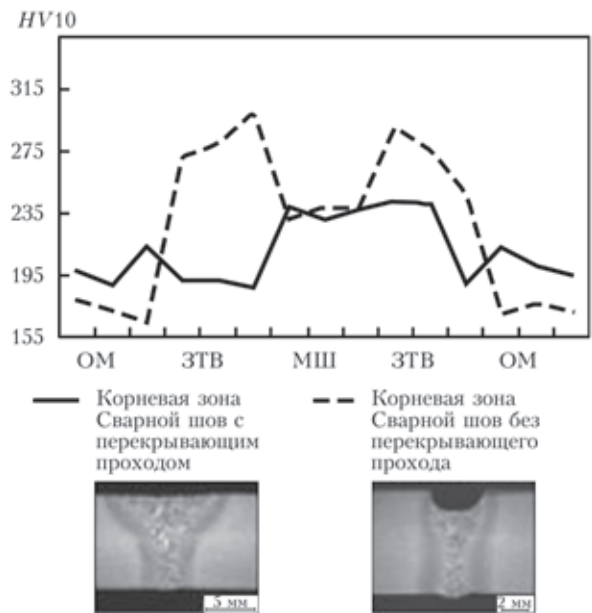


Рис. 4. Зависимость твердости в области корня шва от пространственного положения сварочной головки [2]

се испытаний трубные соединения располагали в определенном положении и фиксировали стандартным инструментом и обычными способами, что обеспечило получение допусков, характерных при строительстве трубопроводов. Выводы о влиянии данных допусков делами, измеряя смещение кромок в сварных соединениях.

Перспективные разработки оборудования и технологии. Важная цель проведенных исследований заключалась в том, чтобы доказать принципиальную возможность применения гибридной сварки при строительстве трубопроводов в более суровых климатических условиях. Полученная информация доказывает значительное влияние конструкции оборудования на процесс сварки.

Опытный образец специализированного оборудования, построенный на базе указанной установки (рис. 5), для реализации необходимых перемещений при кольцевой сварке гибридным лазерно-дуговым способом для труб диаме-

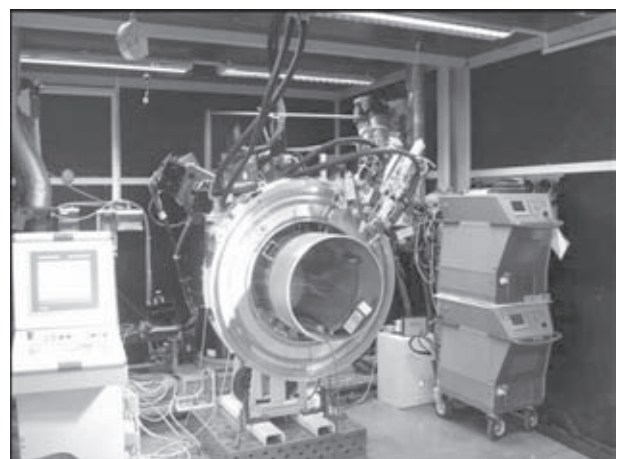


Рис. 5. Специализированная опытная установка для сварки трубопроводов



Таблица 3. Механические свойства сварных соединений стали L360NB с разрушением по основному металлу

$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_n , МПа	δ , %	ψ , %	KCV ₀ , Дж/см ²
345	532	42	71	
368	539	39	69	136...177

тром 500...700 мм, имеет следующие технические характеристики: маршевую скорость при позиционировании до 6, при сварке до 3 м/мин; возможность изменения параметров режима в зависимости от положения; систему слежения за направлением шва.

Встроенная рабочая лазерная головка позволяет применять волоконные твердотельные лазеры с выходной мощностью до 20 кВт.

С одной стороны, основное внимание в данных исследованиях было направлено на определение возможности формирования шва и его корня с применением лазеров указанной мощности и, с другой стороны, на характеристики перекрывающихся зон в начале шва при сварке двумя вертикальными проходами на спуск по окружности трубы.

Эта фаза исследований завершилась проведением испытаний для определения механических свойств стали L360NB. Результаты испытаний на растяжение и среднее значение ударной вязкости образцов типа ISO-V при температуре испытаний 0 °С приведены в табл. 3.

Сварка труб небольшого диаметра с толщиной стенки 3...5 мм. Цель второго исследовательского проекта заключалась в определении необходимости разработки опытного образца установки, позволяющего сочетать орбитальную лазерную сварку стальных труб малого диаметра и их испытание. В данном случае разработка должна была включать сочетание различных способов испытаний для получения надежных результатов.

Изначально было определено, что опытный образец установки должен иметь максимально легкую в управлении конструкцию, с минимальными габаритами. Для указанных областей применения покрываемая толщина стен стальных труб должна составлять 3...5 мм (соответствует внешним диаметрам труб 100...400 мм). Возможные допуски на сварочный зазор и выявляемые размеры дефектов должны соответствовать технологии испытаний.

Оборудование необходимо располагать на расстоянии от сварочных источников питания и устройств обработки измерительных сигналов. Связь обеспечивается соответствующими линиями обслуживания, позволяющими покрывать значительные расстояния между технологическим оборудованием и реальным рабочим изделием. Это позволяет, в зависимости от области приме-

нения, установить оборудование на транспортном средстве по месту выполнения работ.

Опытная установка и методика проведения экспериментов. Для успешного решения основной задачи, прежде всего необходимо было спроектировать устройство для перемещения лазерной оптики по окружности трубы при сварке. Кроме этого, необходимо было предусмотреть место для сенсорной системы, предназначенной для слежения за процессом сварки (LWM) и проведения неразрушающего контроля. Основное внимание при исследованиях уделялось разработке единой стратегии контроля и испытаний с анализом качества швов непосредственно после завершения сварки. Возможно получить необходимую для этого информацию перед сваркой, во время сварки и после окончания процесса в виде различных сигналов. Анализ неоднородностей в сварных соединениях показывает, что большинство из них вызвано нарушениями в последовательности технологических операций. В свою очередь, причина этого заключается в качестве подготовки соединения под сварку (геометрия разделки, наличие зазора или несоответствующее смещение кромок), а также в нарушении необходимых стандартов чистоты.

На первом этапе была разработана конструкция установки и соответствующая компоновка устройств для движения лазерной оптики по окружности трубы, включающая зажимное устройство, необходимое для соединения и фиксации при лазерной сварке труб номинальным диаметром 80...150 мм с толщиной стенки 2...5 мм.

Установка состоит из четырех кольцеобразных пластин, открывающихся вниз и позволяющих разместить свариваемые трубы. Каждая из двух внешних пластин соединена с одной из труб с помощью зажимного устройства. Две внутренние пластины жестко соединены друг с другом. Между этими кольцами расположены компоненты, предназначенные для выполнения операций соединения и испытания (рис. 6).

Центром экспериментальной установки является передающий технологический оптический элемент типа YW30 фирмы «Precitec» с матрицей датчиков, встроенных коаксиально по отношению к траектории перемещения луча, для сбора соответствующих излучений при лазерной сварке. Это оптическое устройство адаптировано для проведения эксперимента.

Для оценки сварного шва, в частности, в отношении центровки кромок и наличия зазора, с помощью камеры регистрируется валик, полученный линейным лазером в направлении поперечном соединению. Камеру и линейный лазер размещают вблизи лазерной оптики по центру между двумя внутренними пластинами несущей

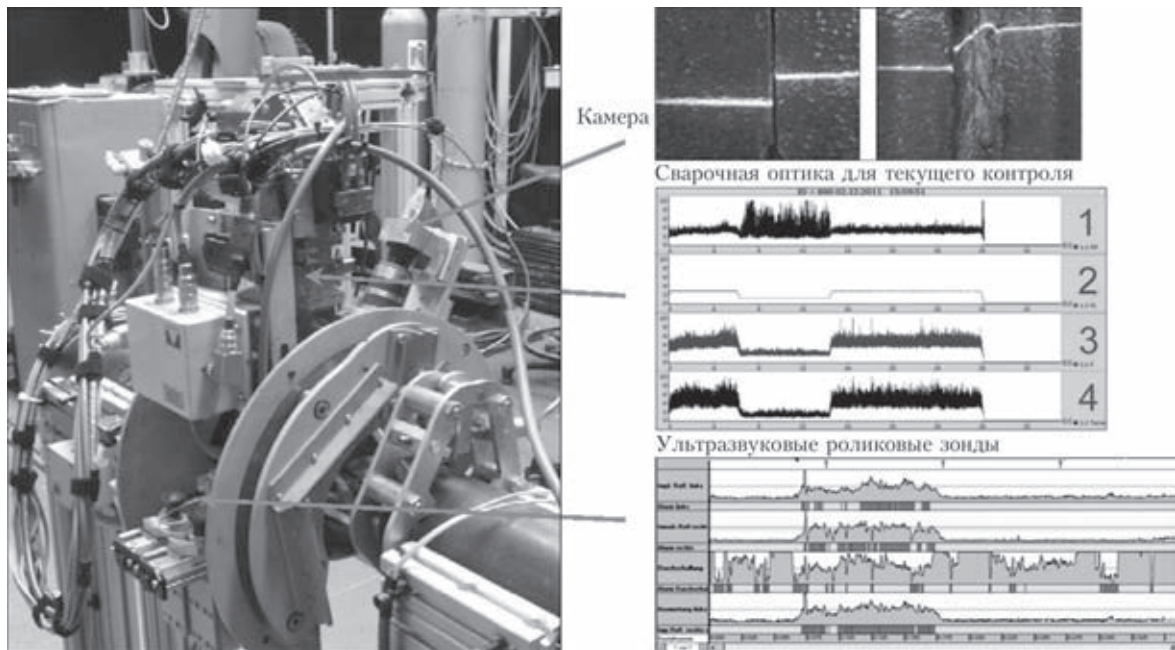


Рис. 6. Специализированная опытная установка с устройством для ультразвукового контроля

системы и перемещают по окружности вокруг трубы. По окончании процесса сварки камеры записывают геометрию поверхности сварного шва. В этом случае особое внимание уделяется зазору и центровке кромок при подготовке под сварку, геометрическим отклонениям шва и наружным сварочным дефектам.

Устройство для ультразвукового контроля состоит из прибора для ультразвукового контроля и роликовых угловых лучевых зондов. Прибор представляет собой многоканальную ультразвуковую систему с пятью каналами, отделенными друг от друга с помощью мультиплексора. Кроме того, применяются

специальные роликовые угловые лучевые зонды для наклонного ультразвукового воздействия под углом 55° с частотой 6 МГц. Эти зонды отличаются тем, что эффективная связь осуществляется не с помощью контактной среды, а с помощью силиконовой шины. Зонд перемещается по этой шине над компонентом, что обеспечивает перемещение только параллельно шву.

В финальной стадии проекта разработаны отдельные системы, состоящие из сварочной оптики, камеры для регистрации геометрии поверхности соединения и текущего контроля процесса, а также скомпонованы ультразвуковые роликовые зонды.

Для непосредственной оценки внутренних дефектов в шве два ультразвуковых роликовых зонда направляли вокруг трубы на заданном расстоянии друг от друга, слева и справа от шва. Устройство для ультразвукового контроля показано на рис. 7.

Контакт между ультразвуковыми роликовыми зондами и трубой поддерживается с помощью натяжения пружины. Для труб различных диаметров возможна регулировка по высоте.

Результаты испытаний материалов. Для определения механических свойств сварных соединений на трубах, полученных лазерной сваркой, была проведена серия экспериментов в условиях, идеальных с точки зрения подготовки кромок под сварку и без искусственных дефектов. Из полученного контрольного образца вырезали по окружности металлографические шлифы последовательно под углом 45° . Образцы показаны на рис. 8 (значения в градусах — углы загиба трубы).

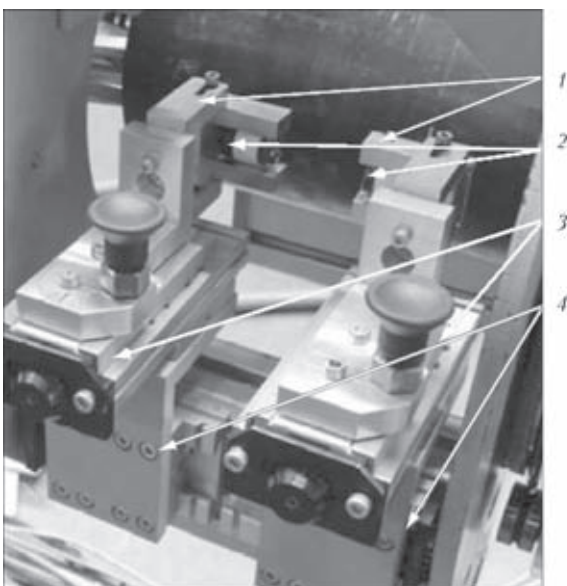


Рис. 7. Устройство для ультразвукового контроля: 1 — зажимное устройство для ультразвуковых зондов; 2 — ультразвуковые роликовые зонды; 3 — оси для грубой регулировки по высоте; 4 — оси для регулировки расстояния до сварного соединения

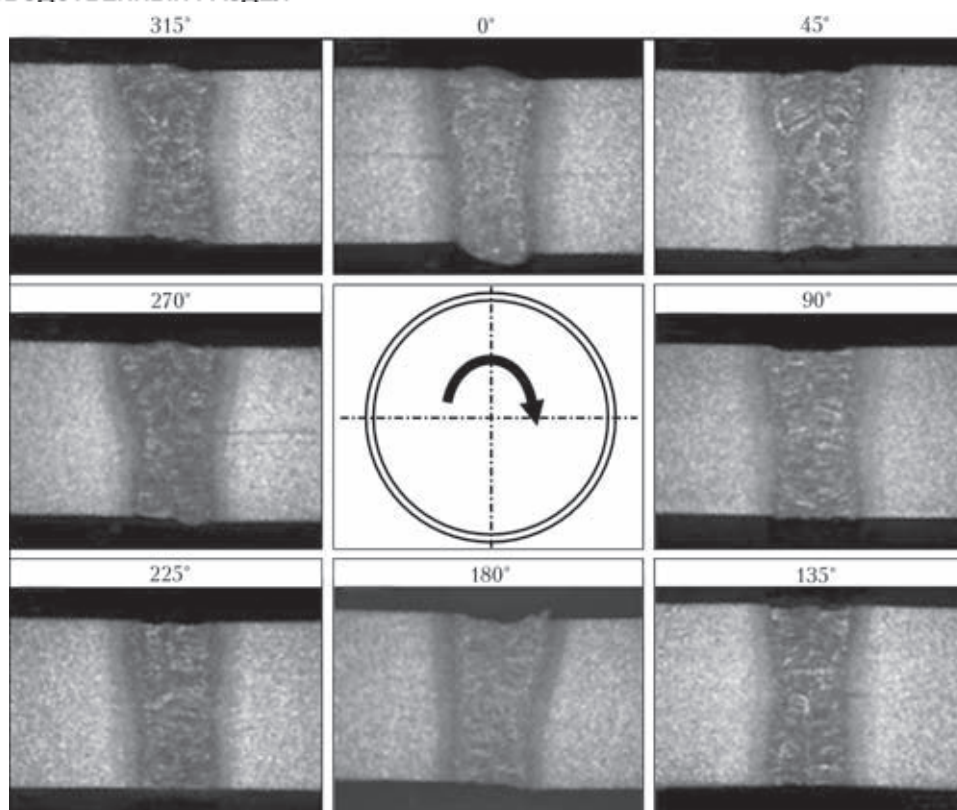


Рис. 8. Макрошлиф образцов соединений (увелич. в 3,5 раз) с различными углами загиба трубы

Таблица 4. Механические свойства сварных соединений стали L360NB толщиной 5 мм в поперечном направлении (разрушение по основному металлу)

Номер образца	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
1	448	487	20,1	70
2	418	467	24,5	70
3	416	466	21,6	67
4	413	463	25,8	62

Как видно из рисунка, на выбранных параметрах не прослеживается влияния постоянно меняющегося положения при орбитальной сварке, что подтверждается постоянным уровнем сигнала от системы контроля. Это относится как к геометрии шва на его верхней и нижней поверхностях, так и к образованию внутренних дефектов в шве. В результате установлено, что оценка в выбранных условиях соответствовала группе В согласно DIN EN ISO 13919-1.

Исследования по определению статической прочности и вязкости швов в соответствии с DVGW Worksheet GW 350 также не обнаружили никаких аномалий. В табл. 4 приведены результаты испытаний на растяжение образцов стали L360NB. Средние значения ударной вязкости образцов типа ISO-V при температуре 0 °С с надрезом в центре шва составили 62...71 Дж/см² и надрезом в ЗТВ — 41...55 Дж/см².

Заключение

С точки зрения повышения эффективности при строительстве трубопроводов большое значение имеют исследования новых процессов сварки труб, в которых основное внимание уделяется повышению скорости сварки при сокращенном количестве проходов. Возможной альтернативой являются лазерная сварка и гибридная лазерно-дуговая сварка, благодаря разработке волоконного лазера, представляющего собой источник лазерного излучения с новыми областями применения [2].

Описанные исследования подтверждают принципиальную возможность использования процессов лазерной сварки при строительстве трубопроводов, а также определения характеристик этих процессов при сварке в смещенном положении, характерном для данного применения.

Они также подтверждают перспективность технологии лазерной сварки с применением лазеров высокой выходной мощности и соответствующими характеристиками луча.

Предлагается использовать гибридный процесс для заварки корневого прохода высокого качества при высоте притупления 12...15 мм. Этот подход интенсивно исследуется в настоящее время.

В результате проделанной работы по разработке стратегии испытаний на месте выполнения работ и текущего контроля процесса лазерной сварки труб на лабораторном уровне была доказана эффективность и перспективность данного подхода.

да. В частности, это означает, что испытания соединений, полученных лазерной сваркой с использованием ультразвукового контроля, возможны в диапазоне толщины стенки 3...5 мм относительно критических дефектов, таких как несплавление, корневые дефекты (непровар) и пористость. Исследования последней версии оборудования показали, что достигнуто реальное взаимодействие отдельных систем камеры, устройств фотооптического контроля процесса и устройств ультразвукового контроля. Это было доказано с помощью моделирования погрешностей. На следующем этапе

работ планируется дальнейшая оптимизация выявляемых размеров дефектов в сварных швах.

Авторы выражают признательность Федеральному министерству экономики и технологии Германии за финансирование проекта.

1. Blackman D., Dorling V., Howard R. High-speed tandem GMAW for pipeline welding // 4th Intern. pipeline conf., Calgary, Alberta, Canada, 2002. – P. 517–523.
2. Keitel S., Neubert J., Ströfer M. Laser based girth welding technologies for pipelines – GMAW gets support // IIW Intern. conf. on advances in welding and allied technologies, Singapore, 2009. – P. 289–294.

Поступила в редакцию 14.01.2014

НОВАЯ КНИГА

Во втором квартале 2014 г. выйдет в свет книга

Л. М. Лобанов, В. И. Махненко, А. С. Миленин. Практические рекомендации Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины по ремонту сваркой магистральных трубопроводов без вывода из эксплуатации. — Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2014. — 8 печ. л.

Издание посвящено вопросам оценки несущей способности магистральных газо- и нефтепроводов с обнаруженными характерными технологическими и эксплуатационными дефектами формы и сплошности материала, а также типичным методам ремонта сваркой без вывода из эксплуатации. В частности, обобщены основные аспекты актуальных отечественных и зарубежных нормативных документов, современные подходы механики разрушения и численного анализа напряженно-деформированного состояния сварных конструкций, новейшие разработки специалистов Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. Сформулированы практические инженерные алгоритмы, позволяющие оценивать фактическую степень поврежденности участков магистральных трубопроводов на основе данных технической диагностики, планировать ремонт дефектных трубопроводных элементов без вывода их из эксплуатации с позиций эффективности и безопасности проведения работ, прогнозировать ресурс эксплуатации участков трубопровода после ремонта.

Для инженерного персонала организаций, эксплуатирующих магистральные трубопроводы, специалистов неразрушающего контроля и технической диагностики трубопроводных систем, научных работников, занимающихся вопросами прочности сварных конструкций и методами восстановления их несущей способности, и преподавательского состава высших учебных заведений соответствующего профиля.

Заказы на книгу направлять в редакцию журнала «Автоматическая сварка».