

ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

УДК 621.791

А.Б. Ушаков, ООО «НТО «ИРЭ-Полус» (Московская обл., Фрязино, РФ)

О.П. Морозова, ООО «НПК «УТС Интеграция» (Москва, РФ)

И.А. Бегунов, ООО «НПК «УТС Интеграция»

Е.М. Шамов, ООО «НПК «УТС Интеграция»

А.А. Орешкин, ООО «НПК «УТС Интеграция»

Е.М. Вышемирский, ПАО «Газпром» (Санкт-Петербург, РФ)

Высокие требования к свойствам сварных соединений магистральных трубопроводов, а также увеличение темпов их строительства и ремонта приводят к необходимости разработки новых технологий сварки и сварочного оборудования.

Авторами статьи предложен способ лазерной сварки в узкощелевую разделку (с углом раскрытия примерно 2°) в качестве альтернативы дуговой сварки при строительстве магистральных трубопроводов. В основу технологии сварки кольцевых неповоротных стыков труб легли преимущества, которые дает использование лазерного луча.

В статье представлены преимущества лазерной сварки труб самоходным агрегатом лазерной сварки (САЛС) с применением двухголовочной установки орбитальной лазерной сварки труб УЛСТ-1 для лазерной сварки неповоротных кольцевых стыков труб.

Приведены требования к сварным соединениям согласно нормативной документации (НД). Показаны этапы разработки технологии, объем, виды и результаты испытаний, как предварительных, так и квалификационных.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: СТРОИТЕЛЬСТВО И РЕМОНТ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ, ДУГОВАЯ СВАРКА, ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА, ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА, САМОХОДНЫЙ АГРЕГАТ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ.

Развитие лазерного оборудования и технологий обработки металлов получило огромный толчок с появлением на рынке волоконных лазеров, мощность которых сегодня достигает десятков и сотен киловатт. Лазерная сварка металлов волоконными лазерами обеспечивает высокие характеристики сварных швов благодаря [1, 2]:

- ведению процесса в режиме глубокого («кинжального») проплавления;
- малому объему расплавленного металла и незначительному размеру зоны термического влияния (ЗТВ);
- высоким скоростям ведения процесса и др.

Помимо этого использование волоконных лазеров позволяет

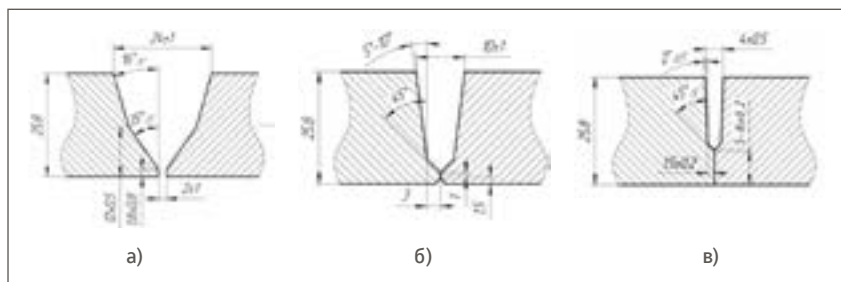


Рис. 1. Разделки кромок: а) для ручной и механизированной сварки [5]; б) для сварки комплексом CRC-Evans [5]; в) для лазерной сварки

осуществлять транспортировку лазерного излучения на большие расстояния от источника, а перемещение луча возможно практически по любой траектории.

В основу технологии лазерной сварки кольцевых неповоротных стыков труб заложена возмож-

ность сварки корня в режиме глубокого проплавления (величина притупления, провариваемого первым проходом, может достигать 8 мм) и заполнения разделки с углом раскрытия 2° с присадочной проволокой [3, 4].

Предлагаемая разделка кромок снижает объем наплавляемого

металла более чем в 3 раза по сравнению с применяемыми дуговыми способами в узкую перетачиваемую разделку кромок (рис. 1). Малый угол раскрытия кромок и применение волоконного лазера в качестве высококонцентрированного источника тепла позволяет вести процесс на скоростях, превышающих скорость других автоматических процессов сварки. При этом лазерный процесс не подвержен влиянию магнитных полей труб и исключает необходимость механических осцилляций горелки, характерных для дуговой сварки.

Отработка технологии проводилась на трубах класса прочности К60 с толщиной стенки 25,8 мм. Для реализации проекта была разработана установка УЛСТ-1 диаметром 1420 мм (рис. 2) для лазерной сварки неповоротных

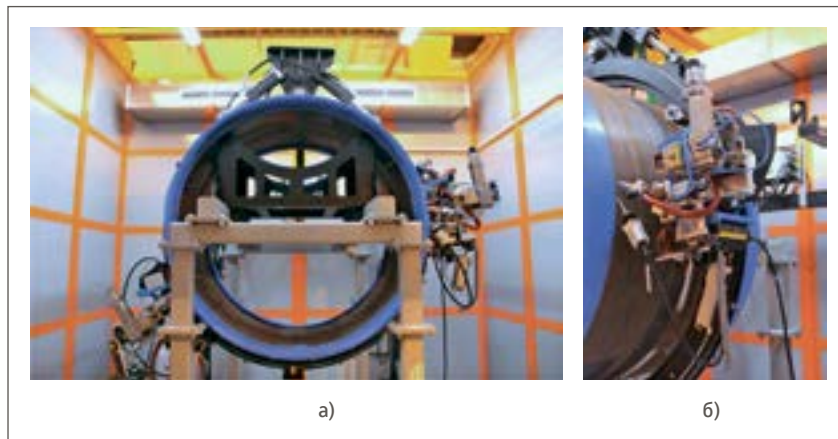


Рис. 2. Оборудование для лазерной сварки труб: а) общий вид; б) сварочная головка

кольцевых стыков труб, в состав которой входят: орбитальный манипулятор, включающий две оптические лазерные головки, направляющий пояс и механизм подачи проволоки, два лазера и

два chillera, пневмокомпрессор, электрошкаф и газовые баллоны.

Технология лазерной сварки неповоротных кольцевых стыков труб большого диаметра (ТБД) была разделена на два этапа:

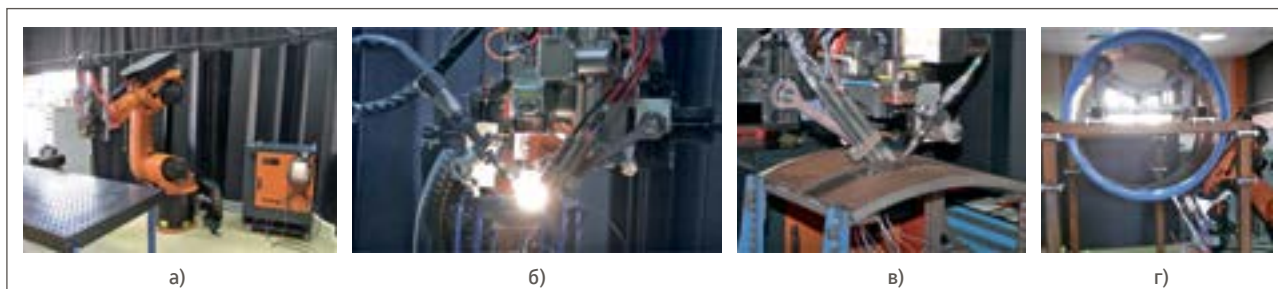


Рис. 3. Отработка технологии на роботизированном комплексе: а) внешний вид роботизированного комплекса; б) сварка пластин; в) сварка сегментов; г) сварка труб

Требования к сварным соединениям согласно нормативной документации

Тип испытания		СТО Газпром 2-2.2-136-2007	СТО Газпром 2-3.7-050-2006 (DNV-OS-F101)
Статическое растяжение	поперек сварного шва	Временное сопротивление разрыву – не ниже нормативного значения временного сопротивления разрыву основного металла труб	
	металла шва в поперечном направлении	–	Верхний предел текучести, предел прочности и относительное удлинение – не менее, чем задано для основного металла
Статический изгиб		Угол изгиба – не менее 120°	Угол изгиба – не менее 180°
Испытания на ударный изгиб (по Шарпи)		Ударная вязкость металла шва и ЗТВ при температуре –40 °С не менее 50 Дж/см ² , при этом минимальное значение ударной вязкости для одного образца – не менее 37,0 Дж/см ²	Среднее арифметическое по результатам испытаний отдельных образцов в каждом положении – не менее 50 Дж и полученное на отдельном образце – не менее 40 Дж
Твердость		Твердость металла шва – не более 280 HV ₁₀ , зоны термического влияния – не более 325 HV ₁₀	Твердость металла шва и зоны термического влияния – не более 300 HV ₁₀
Вязкость разрушения		–	Минимальное значение раскрытия в вершине трещины (CTOD) – 0,2 мм

сварка корня и заполнение разделки с нанесением облицовочного слоя.

Сварка корня проводилась за один проход с добавлением присадочной проволоки. Заполнение узкощелевой разделки присадочной проволокой осуществлялось с применением сканирования лазерным лучом.

После операции подготовки кромок на трубу был установлен направляющий пояс, затем производились сборка труб на внутреннем центраторе, предварительный подогрев стыка и сварка корня шва. Заполнение разделки и облицовка осуществлялись уже на других сварочных постах.

Требования к сварным соединениям согласно нормативной документации приведены в таблице.

Поскольку для отработки технологии необходимо было производить сварку в различных пространственных положениях, а также экспериментировать с наклонами оптической лазерной головки, для удобства использовали роботизированный комплекс (рис. 3).

Сначала режимы подбирались на пластинах в различных пространственных положениях, затем отрабатывались на сегментах труб и переносились на реальный стык трубы.

Сварка корня проводилась с высотой притупления 5–8 мм.

Наибольший интерес представлял подбор способа сварки и режима в потолочном положении ввиду трудности формирования обратного валика необходимой высоты, а также стекания металла внутрь разделки (рис. 4). Проводился проплав пластин толщиной 5–8 мм, подбирался угол скоса притупления в разделке от 0 до 45°, а также выполнялась сварка по зазору.

Для заполнения разделки проволокой подбирались оптимальная плотность мощности излучения, а также параметры колебания лазерного луча.

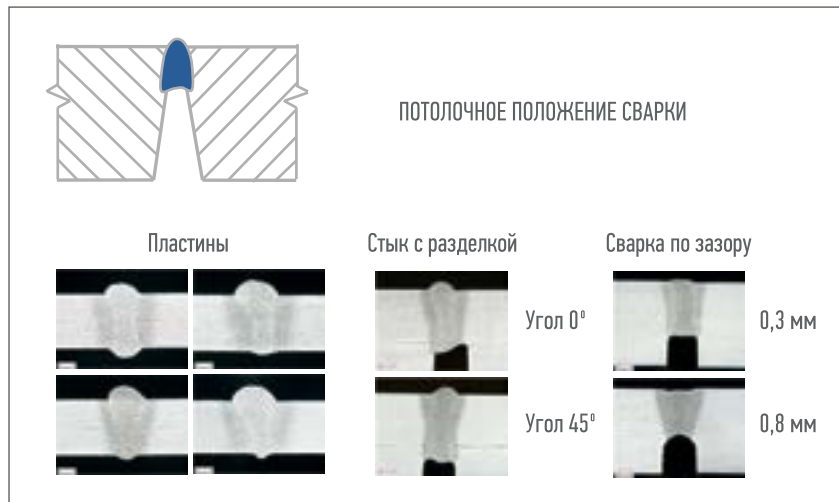


Рис. 4. Сварка корневого слоя шва в потолочном положении

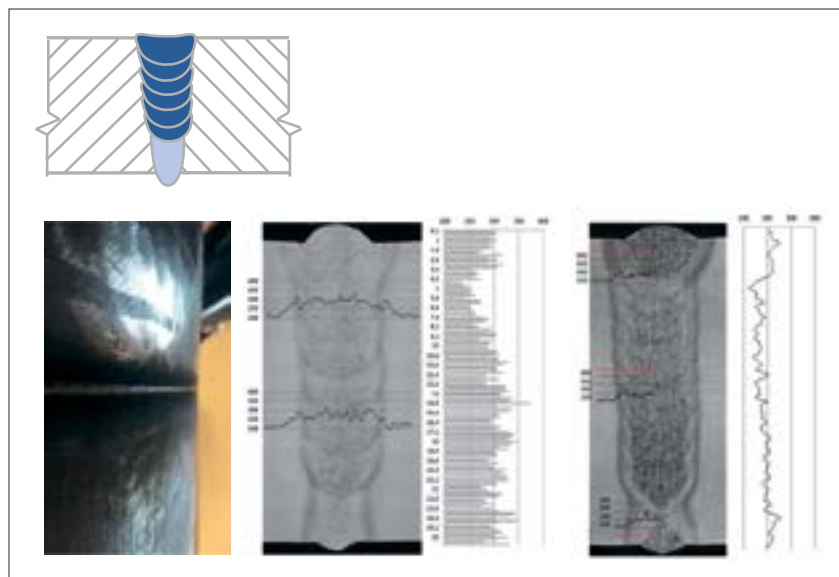


Рис. 5. Шлифы поперечного сечения сварных швов с различной высотой заполняющих слоев и графики изменения твердости по ширине шва

На рис. 5 представлены шлифы поперечного сечения сварных швов с различной высотой заполняющих слоев. Приведены графики изменения твердости по ширине шва.

Для нанесения облицовки производился подбор погонной энергии для получения необходимого уровня твердости в ЗТВ. Также отрабатывалось получение валика стабильной геометрии в различных пространственных положениях.

Микроанализ сварных швов, выполненных в различных про-

странственных положениях, показал, что геометрия и структуры швов схожи. Ширина ЗТВ составила максимум 1,8 мм.

Структура как корневого шва, так и околошовного участка зоны термического влияния (ОШУ ЗТВ) оказалась преимущественно бейнитной с незначительным содержанием мартенситной фазы. Твердость ОШУ ЗТВ составила 250–265 HV₁₀, металла шва – 230–245 HV₁₀ (рис. 6).

В металле заполняющих швов наблюдалась практически бейнитная структура – как в самом

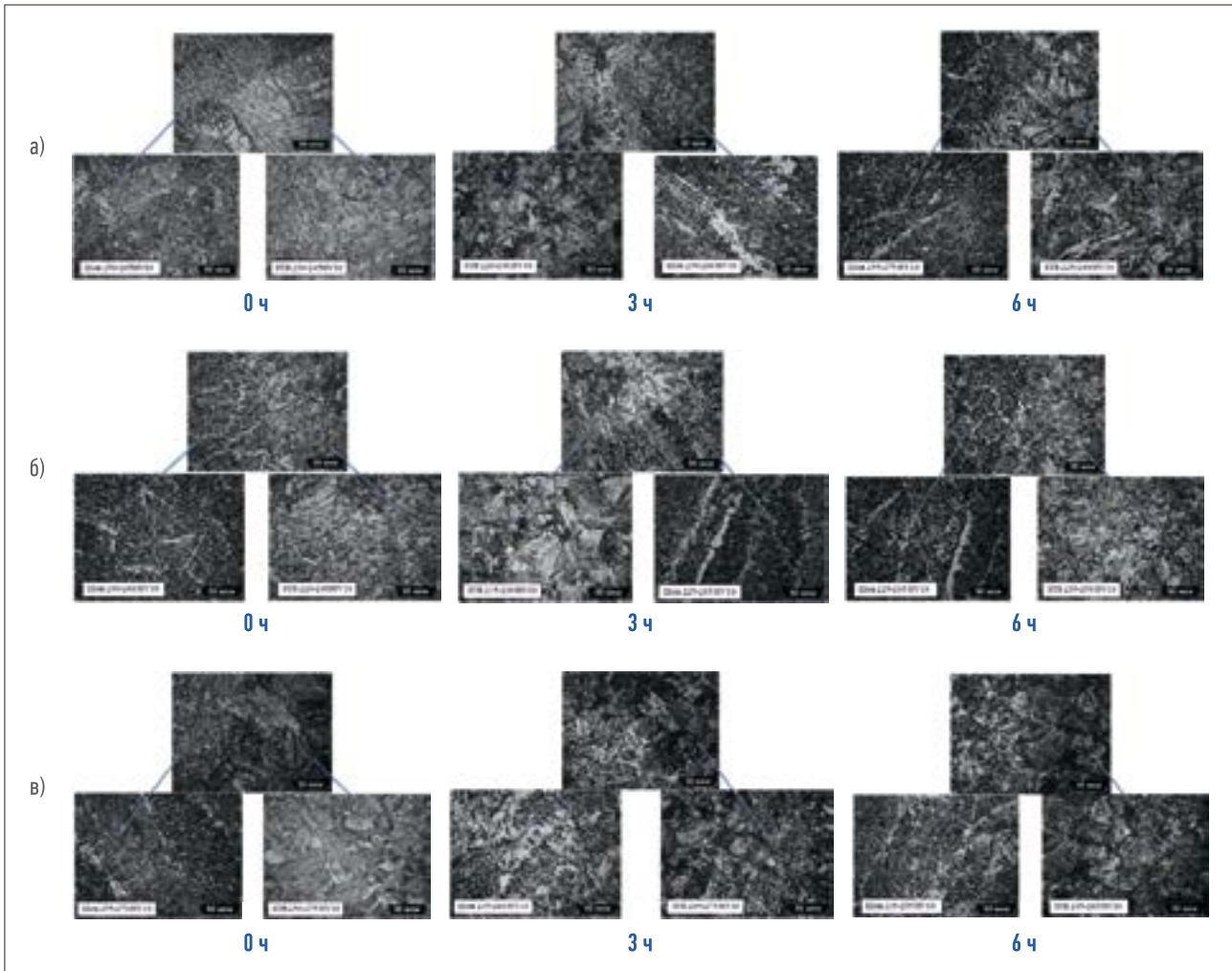


Рис. 6. Анализ микроструктуры сварных соединений:
 а) корневого слоя шва; б) заполняющих слоев шва; в) облицовочного слоя шва

шве, так и в его ОШУ ЗТВ. Их твердость была практически одинакова и колебалась в пределах 220–240 HV₁₀.

В облицовочном шве было отмечено формирование структур, отличающихся более высокой дисперсностью и твердостью (255–270 HV₁₀). Максимальная твердость наблюдалась на линии сплавления и не превышала 280 HV₁₀.

Для получения данных о скорости охлаждения сварных соединений были проведены исследования с записью термических циклов. Поскольку считается, что скорость охлаждения от всех заполняющих слоев одинакова, то измерения проводились только для первого заполняющего слоя.

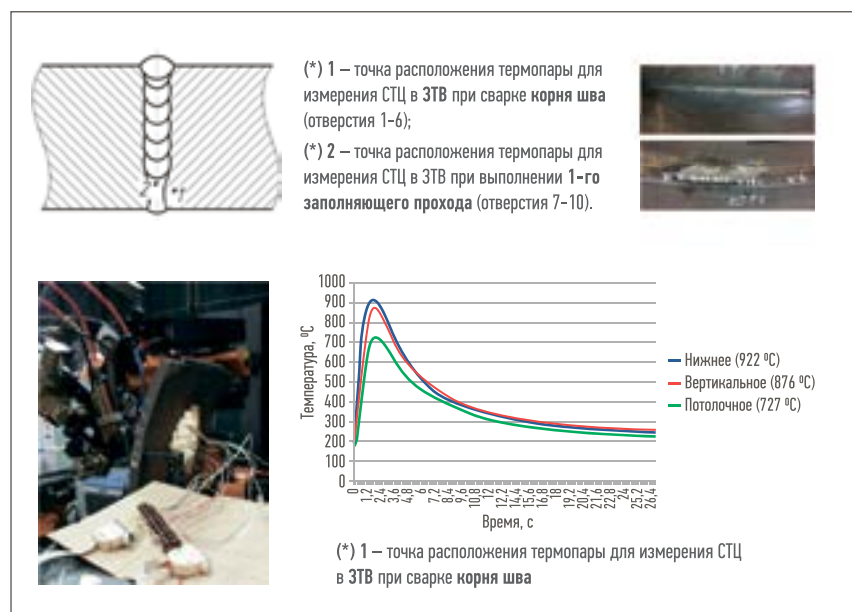


Рис. 7. Запись термических циклов

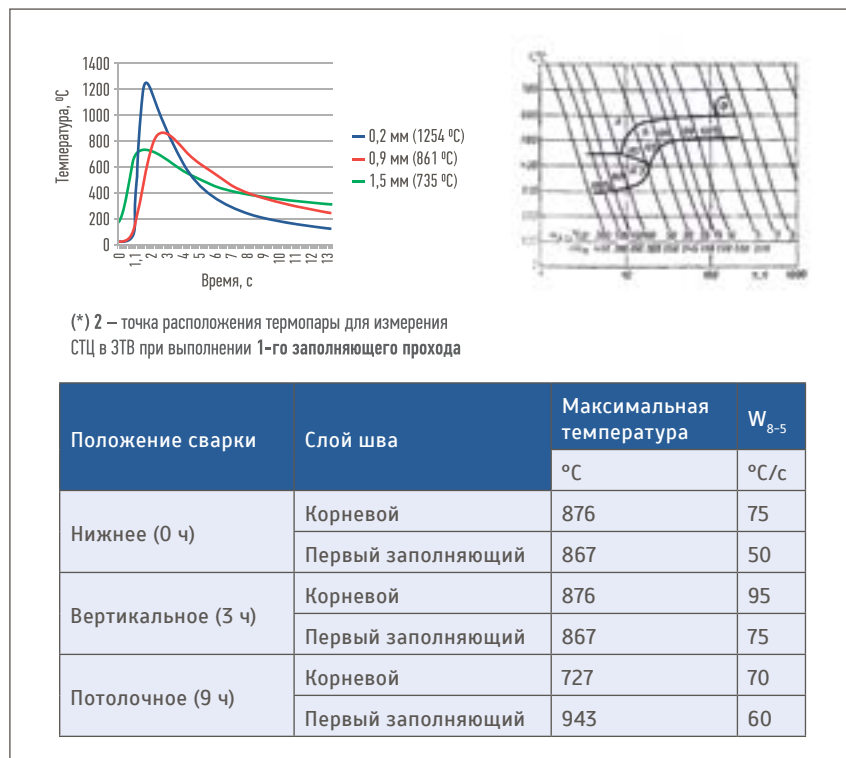


Рис. 8. Анализ скоростей охлаждения при лазерной сварке труб

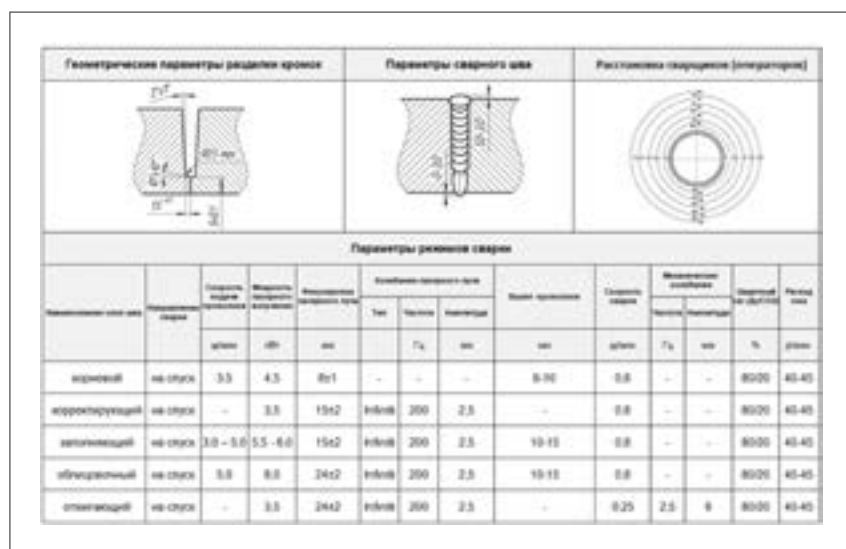


Рис. 9. Последовательность для лазерной сварки неповоротных кольцевых стыков

Запись термических циклов проводилась на сегментах труб в трех пространственных положениях: нижнее, вертикальное и потолочное (рис. 7).

На рис. 8 показаны скорости охлаждения, полученные при лазерной сварке трубной стали. Сопоставление скоростей охлаждения, полученных при лазерной

сварке сегментов, с термокинетической диаграммой распада аустенита стали типа 10Г2ФБЮ показало, что при скоростях охлаждения свыше 50 °C/c в сварном соединении начинается формирование мартенситной фазы.

При сварке контрольных сварных соединений (КСС) были использованы элементы труб с

разделкой кромок, приведенной на рис. 9. Сварка осуществлялась со следующими проходами: корневой (сварка притупления), корректирующий (выравнивание поверхности верхней части корневого шва для подготовки под заполнение), заполняющий и облицовочный.

Результаты предварительных механических испытаний образцов, вырезанных из КСС, были признаны удовлетворяющими требованиям нормативной документации.

При испытаниях на статическое растяжение разрушение происходило по основному металлу. После статического изгиба на 180° дефектов не было обнаружено. Ударная вязкость сварных соединений оказалась выше установленной нормы (рис. 10).

Результаты механических испытаний образцов, вырезанных из КСС (полученные на базе испытательного центра «Политехтест» при Санкт-Петербургском политехническом университете им. Петра Великого), также удовлетворяли требованиям нормативной документации (рис. 11).

Результаты неразрушающего контроля показали отсутствие дефектов недопустимых размеров и в целом небольшое число дефектов на протяжении всего кольцевого сварного шва.

Неразрушающий контроль был выполнен следующими методами: визуальным измерительным (ВИК), радиационным (РК) и ультразвуковым (УЗК).

Для проведения РК использовалась система цифровой радиографии «ТРАНСКАН» с панорамной схемой контроля.

Для проведения УЗК была использована система механизированного УЗК Harfang Veo GS с комбинированным акустическим блоком, включающим преобразователи на фазированных решетках и TOFD (дифракционно-временной метод контроля).

Ранее (до сварки КСС) были выполнены исследования темпле-

ИСПЫТАНИЯ НА СТАТИЧЕСКОЕ РАСТЯЖЕНИЕ

Без снятия усиления

№ образца	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %
1	616	21
2	622	21
3	605	20
4	608	23

Со снятым усилением

№ образца	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %
1	616	21
2	617	20
3	606	19
4	618	21



Разрушение по основному металлу



ИСПЫТАНИЯ НА СТАТИЧЕСКИЙ ИЗГИБ

Угол изгиба - 180°. Трещин не обнаружено



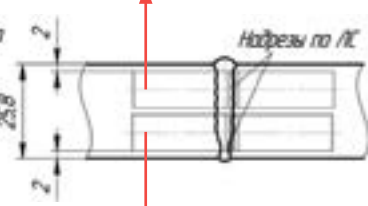
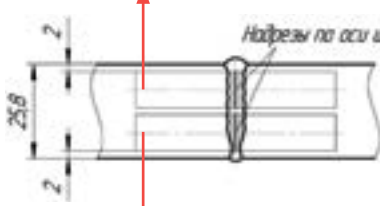
ИСПЫТАНИЯ НА УДАРНЫЙ ИЗГИБ (по Шарпи)

Надрез по оси шва

Температура испытаний, °С	Ударная вязкость (среднее значение), Дж/см ²
0	225
-20	229
-40	89

Надрез по ЛС

Температура испытаний, °С	Ударная вязкость (среднее значение), Дж/см ²
0	315
-20	260
-40	270



Температура испытаний, °С	Ударная вязкость (среднее значение), Дж/см ²
0	313
-20	337
-40	343

Температура испытаний, °С	Ударная вязкость (среднее значение), Дж/см ²
0	280
-20	285
-40	278

Рис. 10. Результаты предварительных механических испытаний образцов, вырезанных из КСС

Для реализации технологии лазерной сварки труб на базе установки УЛСТ-1 в трассовых условиях в начале 2017 г. был разработан самоходный агрегат лазерной сварки – САЛС (рис. 13).

При проектировании контейнера для размещения оборудования была предусмотрена возможность работы САЛС в сложных погодных условиях, быстрой замены вышедших из строя механизмов через боковые панели, обеспечения необходимого режима. Внутри контейнера располагаются:

- два волоконных иттербиевых лазера серии ЛС, каждый из которых обеспечивает выходную мощность до 10 кВт, производства ООО «НТО «ИРЭ-Полюс». Конструкции лазера выполнены в виде отдельных стоек. Для транспортировки выходного излучения из стойки выходит волоконно-оптический кабель, оканчивающийся оптическим коннектором;
- два чиллера серии ЛС, которые автономно обеспечивают охлаждение;
- блок электропитания и управления (включая программатор – для программирования и проверки параметров на УЛСТ);
- дизельный генератор мощностью 160 кВт;
- промышленный винтовой маслозаполненный компрессор Atlas Copco GA22 FF;
- две кассеты для баллонов с газовой смесью емкостью по четыре баллона в каждой.

Палатка сварщика служит для размещения орбитального манипулятора (навесного сварочного оборудования) и представляет собой сборно-разборную конструкцию, имеющую две двери, лестницу на крышу, четыре вентилятора, два прожектора, четыре пенала под сварочную проволоку, четыре розетки на напряжение 220 В переменного тока, два держателя для шлифмашинки.

Навесное сварочное оборудование – орбитальный манипулятор – включает (рис. 14):

тов, вырезанных из сварного шва. Трехмерная компьютерная рентгеновская томография показала, что в представленных темплатах

недопустимые дефекты отсутствовали [5], о чем свидетельствуют результаты, приведенные на снимках сегмента шва (рис. 12).

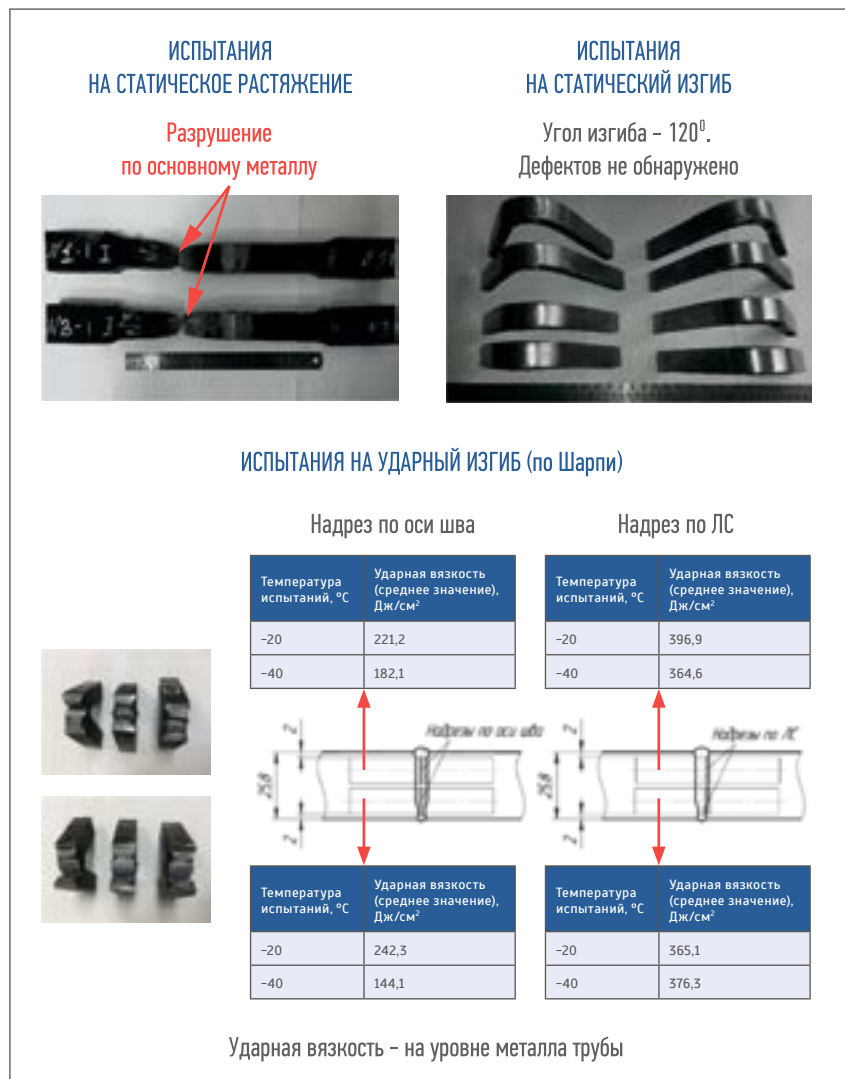


Рис. 11. Результаты механических испытаний образцов, вырезанных из КСС (полученные на базе Испытательного центра «Политехтест» при Санкт-Петербургском политехническом университете им. Петра Великого)



Рис. 12. Результат компьютерной рентгеновской томографии сварного соединения



Рис. 13. Основные элементы и компоновка самоходного агрегата лазерной сварки (САЛС)

- направляющий пояс (на рисунке показаны как пневматический пояс, так и предусмотренный в комплекте набор гибких направляющих поясов на диаметры 500–1420);

- две сварочные каретки, оснащенные оптической лазерной головкой FLW, датчиком положения сварочной каретки, датчиком слежения за разделкой кромок, механизмом подачи проволоки;
- пульт дистанционного управления.

В качестве самоходного шасси был выбран трековый трактор с двигателем ЯМЗ-НДЗ и усиленной рамой с увеличенными сечениями лонжеронов.

Кран-манипулятор имеет грузоподъемность до 1,7 т на вылете стрелы 7 м. Контейнер – съемный, изготовленный из сэндвич-панелей, с автономной системой пожаротушения и отопления. В стандартной комплектации предусмотрена эксплуатация

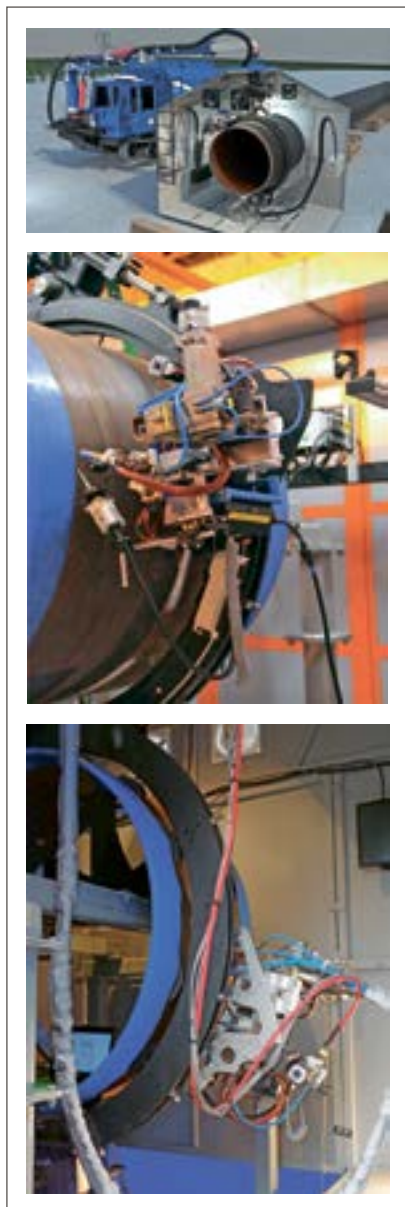


Рис. 14. Навесное сварочное оборудование (орбитальный манипулятор) установки УЛСТ

машины в условиях низких температур. Габаритные размеры шасси позволяют производить отгрузку агрегатов железнодорожным транспортом по 2 шт. на платформе (рис. 15).

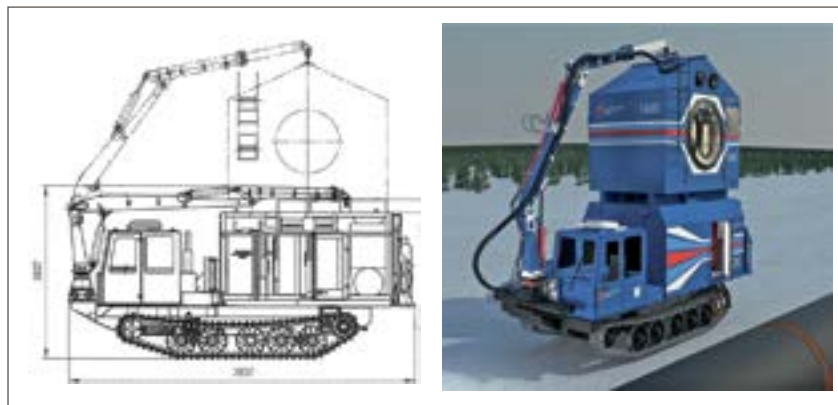


Рис. 15. Самоходное шасси с краном-манипулятором



Рис. 16. Демонстрация САЛС с применением установки УЛСТ-1 на 18-й Международной выставке-конгрессе «СВАРКА/WELDING-2017»

Преимущества лазерной сварки труб комплексом САЛС с применением установки УЛСТ-1 следующие:

- высокая производительность сварочно-монтажных работ;
- низкий расход сварочных материалов и защитных газов;
- высокие механические свойства сварных соединений;
- низкое энергопотребление (за счет высокого КПД волоконных лазеров) – 160 кВт;
- малое разбрызгивание металла;
- возможность применения данного оборудования в широком спектре номенклатуры труб (ди-

аметром 500–1420 мм, толщиной 8–38 мм), технологий и сварочных материалов.

САЛС труб с применением УЛСТ-1 был продемонстрирован на 18-й Международной выставке-конгрессе «СВАРКА/WELDING-2017» (рис. 16), проходившей 25–28 апреля 2017 г. в Санкт-Петербурге.

В настоящее время комплекс САЛС с применением УЛСТ-1 готовится к серийному производству. Формируется инфраструктура для продаж и сервисного обслуживания, гарантийный срок на комплекс с промышленной лазерной установкой составит три года. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисуров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: Учеб. пособие для вузов / Под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 664 с.
2. Ready J.F. et al. LIA Handbook of Laser Materials Processing. Orlando, Laser Institute of America, 2001, 704 pp.
3. Гюок С., Гююенюк А., Ламмерс М., Ретмайер М. Особенности процесса орбитальной лазерно-дуговой сварки толстостенных труб большого диаметра // Автоматическая сварка. 2010. № 9. С. 5–13.
4. Чубуков И.А. Разработка способа лазерной сварки конструкционных сталей в щелевую разделку с подачей присадочной проволоки.: дисс. ... канд. техн. наук. М., 1989. 186 с.
5. СТО Газпром 2-2.2-136-2007. Инструкция по технологиям сварки при строительстве и ремонте промышленных и магистральных газопроводов. Часть I [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://files.stroyinf.ru/Data1/54/54452/> (дата обращения: 15.05.2017).