

Нефтегазовое дело. 2023. Т. 21, № 5. С. 105-116. ISSN 2073-0128 (print)

Petroleum Engineering. 2023. Vol. 21. No. 5. P. 105-116. ISSN 2073-0128 (print)

Научная статья

УДК 620.197.5:622.691.4.052.006

DOI: 10.17122/ngdelo-2023-5-105-116

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ СВАРОЧНЫХ РАБОТ ПРИ СООРУЖЕНИИ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА С ПРИМЕНЕНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Екатерина Владимировна Семиткина, Марина Владимировна Терентьева,
Владимир Орович Некучаев

Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Россия

Corresponding author

Екатерина Владимировна Семиткина, ekaterina-semitkina@mail.ru

Аннотация. В настоящей работе изучена технология лазерной сварки кольцевых стыков труб магистрального газопровода на основе имеющегося определённого опыта ее применения на объектах газотранспортной системы, и произведена оценка возможности применения ее в качестве альтернативы автоматической дуговой сварке при проведении строительных и ремонтно-восстановительных работ. Выполнен анализ применения лазерного излучения для орбитальной сварки магистральных трубопроводов, который показал, что применение данной технологии позволяет увеличить производительность сварочного процесса, получать более благоприятные структуры в шве и в переходной зоне, позволяет обеспечивать высокий уровень механических свойств и плотности швов. Температурно-деформационные условия в зоне сварного соединения способствуют снижению вероятности образования горячих и холодных трещин.

Проведено моделирование участка трубопровода со сварными соединениями, выполненными автоматической дуговой сваркой и лазерной сваркой (далее ЛС). При моделировании сварных соединений были учтены их геометрические параметры для сравниваемых технологий сварки, а также площадь и объем наплавленного металла, которые теоретически соответствуют натуральным значениям. На участок трубы со сварным швом были наложены нагрузки, имитирующие три вида механических испытаний: растяжение, сжатие и изгиб, которые возникают в случае тепловых деформаций и просадки грунта при эксплуатации трубопровода.

В ходе исследования были определены напряжения в сечении сварного соединения, полученного по двум технологиям сварки, которые показывают уровень механических свойств шва. Проведены сравнительный анализ и оценка эксплуатационной надежности магистрального газопровода со сварными соединениями, выполненными современными автоматизированными технологиями сварки.

Ключевые слова

сварка магистрального трубопровода; лазерная сварка; автоматизированная технология; строительно-монтажные работы; улучшение качества шва; узкощелевая разделка; качество шва

For citation

Семиткина Е.В., Терентьева М.В., Некучаев В.О. Сравнительный анализ и моделирование режимов сварочных работ при сооружении магистрального трубопровода с применением автоматизированных технологий // Нефтегазовое дело. 2023. Т. 21, № 5. С. 105-116. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-5-105-116>.

Original article

COMPARATIVE ANALYSIS AND SIMULATION OF WELDING MODES DURING THE CONSTRUCTION OF THE MAIN PIPELINE USING AUTOMATED TECHNOLOGIES

Ekaterina V. Semitkina, Marina V. Terent'eva, Vladimir O. Nekuchaev

Ukhta state technical university, Ukhta, Russia

Автор, ответственный за переписку

Ekaterina V. Semitkina, ekaterina-semitkina@mail.ru

Abstract. In the present work, the technology of laser welding of the circumferential joints of pipes of the main gas pipeline was studied on the basis of the existing certain experience of its application at the facilities of the gas transmission system and an assessment was made of the possibility of using it as an alternative to automatic arc welding during construction and repair and restoration work. An analysis was made of the use of laser radiation for orbital welding of main pipelines, which showed that the use of this technology makes it possible to increase the productivity of the welding process, to obtain more favorable structures in the seam and in the transition zone, and to ensure a high level of mechanical properties and weld density. Temperature and deformation conditions in the zone of the welded joint help to reduce the likelihood of hot and cold cracking. Modeling of a pipeline section with welded joints made by automatic arc welding and laser welding (hereinafter referred to as LS) was carried out. When modeling welded joints, their geometric parameters for the compared welding technologies were taken into account, as well as the area and volume of the deposited metal, which theoretically correspond to natural values. Loads were applied to the pipe section with a welded seam, imitating three types of mechanical tests: tension, compression and bending, which occur in the case of thermal deformations and soil subsidence during pipeline operation.

In the course of the study, stresses were determined in the cross section of a welded joint obtained using two welding technologies, which show the level of mechanical properties of the weld. A comparative analysis and evaluation of the operational reliability of the main gas pipeline with welded joints made by modern automated welding technologies has been carried out.

For citation

Semitkina E.V., Terent'eva M.V., Nekuchaev V.O. Sravnitel'nyj analiz i modelirovanie rezhimov svarochnykh работ pri sooruzhenii magistral'nogo truboprovoda s primeneniem avtomatizirovannykh tekhnologij // [Comparative analysis and simulation of welding modes during the construction of the main pipeline using automated technologies] // *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2023, Vol. 21, No. 5. pp. 105-116. [in Russian]. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-5-105-116>.

Введение

За последнее десятилетие более половины зарегистрированных разрушений каких объектов были обусловлены коррозионным рас- трескиванием под напряжением (КРН) в боль- шей степени в зоне сварного соединения, та- ким образом, высокие требования к сварным стыкам при строительстве и ремонте МГ при- водят к необходимости разработки новых тех- нологий сварки и сварочного оборудования.

Одной из таких технологий является лазер- ная сварка. Ее специфику составляют высокие

скорости нагрева и охлаждения в узкой зоне локального взаимодействия лазерного луча и свариваемого металла, что не позволяет при- менить общепринятые представления о фор- мировании структуры и свойств сварного со- единения, а значит, и спрогнозировать надеж- ность сварного соединения.

Поэтому детальное изучение напряженно- деформированного состояния сварных соеди- нений, выполненных с применением техноло- гии лазерной сварки, определение, а также оценка возможности ее применения в каче-

Keywords

main pipeline welding; laser welding; automated technology; construction and installation works; weld quality improvement; narrow gap groove; weld quality

стве альтернативы наложения нагрузки дуговой сварки при проведении строительных и ремонтно-восстановительных работ является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит повысить эффективность эксплуатации трубопроводных магистралей.

Цель исследования — сравнительный анализ сварных соединений магистральных трубопроводов, выполненных автоматизированными технологиями сварки, при моделировании на них воздействий механических испытаний, а также оценка возможности применения лазерной сварки в качестве альтернативы автоматической дуговой сварке при проведении строительно-монтажных работ (СМР) на магистральных трубопроводах (МТ).

Задача исследования — анализ возникающих напряжений в сварных соединениях трубопровода, и последующая обработка полученных результатов с целью определения надежности эксплуатации МТ со сварными стыками, выполненными по технологии лазерной сварки.

Основная часть строительного периода магистрального трубопровода приходится на выполнение сварочно-монтажных работ. Поэтому при сооружении магистральных трубопроводов остро стоит проблема выполнения сварочных работ с высокой производительностью и стабильным качеством сварных соединений [1].

В отрасли трубопроводного транспорта существуют отработанные технологии соединения неповоротных стыков трубопроводов дуговыми методами сварки, такие как:

- механизированная сварка в углекислом газе;
- механизированная сварка порошковой проволокой;
- автоматизированная сварка под флюсом;
- автоматизированная сварка с принудительным формированием шва порошковой проволокой;
- ручная дуговая сварка.

Однако, как показывает практика, соединения, выполненные по данным технологиям, имеют посредственные показатели качества, связанные с появлением в процессе эксплуатации МГ следующих нарушений:

- трещины в местах сварки, переходящие на металл трубопровода;

- неровности внутренней и внешней поверхности МТ;

- нарушение герметичности в местах соединения материалов;

- деформация трубопровода, появление вмятин и складок;

- появление ржавчины на стенках трубопровода;

- повреждение отдельных частей конструктивных элементов трубопровода;

- изменение формы поперечного сечения трубопровода в местах кольцевых стыков.

В качестве альтернативы дуговой сварки и автоматизированной сварки комплексом «CRC-Evans» при строительстве магистральных трубопроводов активно ведутся исследования [3–4, 6–7] по применению технологии лазерной сварки (рисунок 1) неповоротных кольцевых стыков труб в узкощелевую разделку (с углом раскрытия примерно 2°), в основу которой легли преимущества использования волоконного лазера самоходными двухголовочными установками «УЛСТ-1» компании ООО «НТО «ИРЭ — Полюс» и ООО «НКП «УТС Интеграция», которые в свою очередь проявили следующие преимущества над аналогами [2]:

- возможности ведения процесса в режиме глубокого («кинжального») проплавления;

- образования малого объема расплавленного металла и незначительных размеров зоны термического влияния;

- высоких скоростей охлаждения.

Анализ исследований [5, 8–11] микрошлифов неповоротных сварных соединений (рисунок 2), выполненных лазерной сваркой, показывает следующие показатели качества таких стыков:

- ширина ЗТВ (зона термического влияния) заполняющих и облицовочного шва составляет 1,3–1,7 мм, а корневого шва находится в пределах 1,5–1,8 мм;

- структура металла корня сварного соединения состоит из мелкодисперсных столбчатых кристаллов, направленных к центральной оси;

- структура металла сварного шва разделки имеет единую кристаллическую структуру, со следами перевара каждого последующего валика на глубину не менее 1 мм. Эффект роста зерна в области вторичного нагрева отсутствуют.

Кроме качества структуры слоев шва технологии лазерной сварки, при исследовании

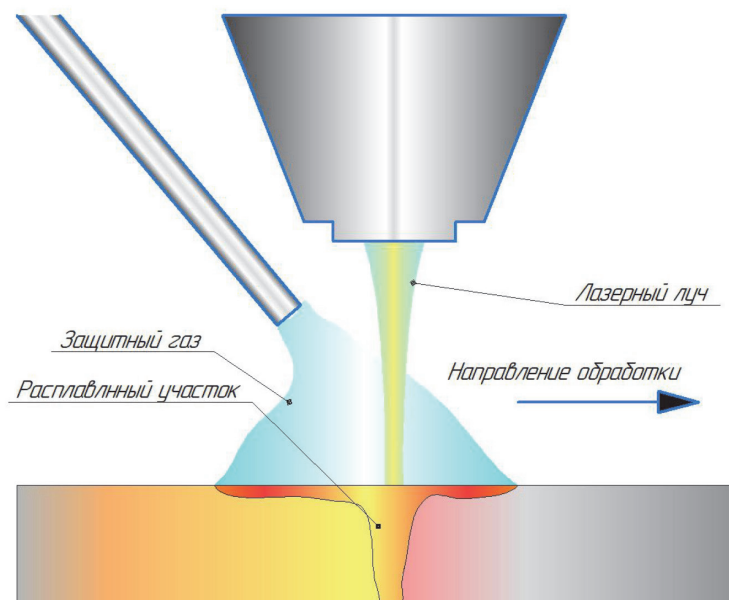


Рисунок 1. Схема лазерно-дуговой сварки

Figure 1. Laser arc welding diagram

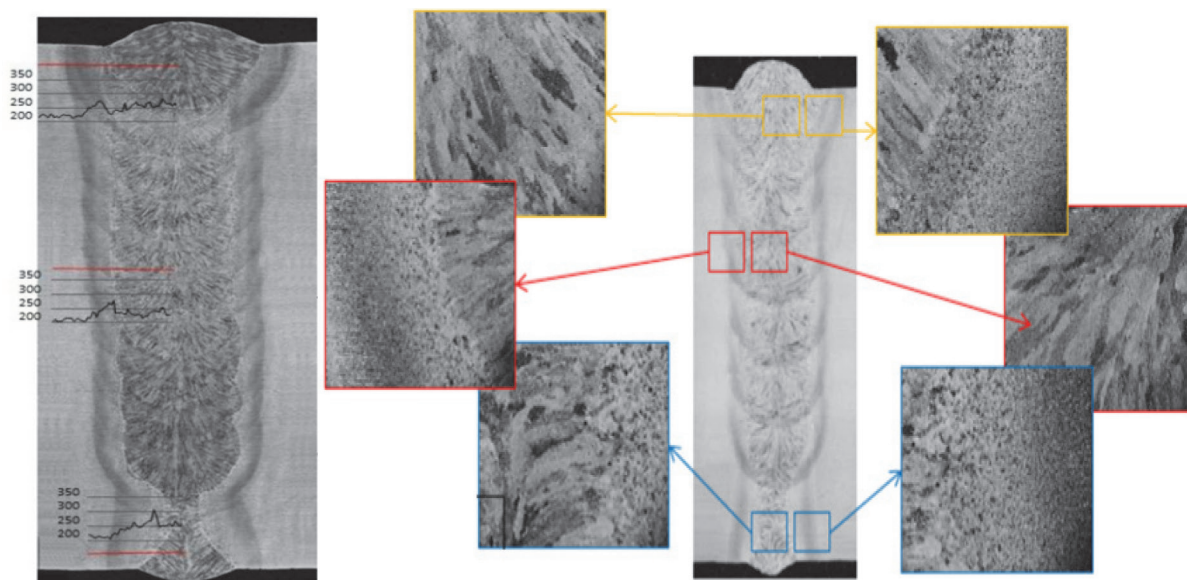


Рисунок 2. Микроструктура участков сварного соединения, выполненного по технологии ЛС

Figure 2. Microstructure of sections of welded joint made according to the laser arc welding technology

режимов работы автоматизированной сварки комплексом «CRC-Evans» и комплексом лазерной сварки «УЛСТ-1» проволокой сплошного сечения $\varnothing 1,2$ мм в защитном газе Ar/CO_2 для магистрального трубопровода 1420×25 мм выявлены следующие технологические преимущества ЛС по рабочим параметрам процесса сварки (таблица 1).

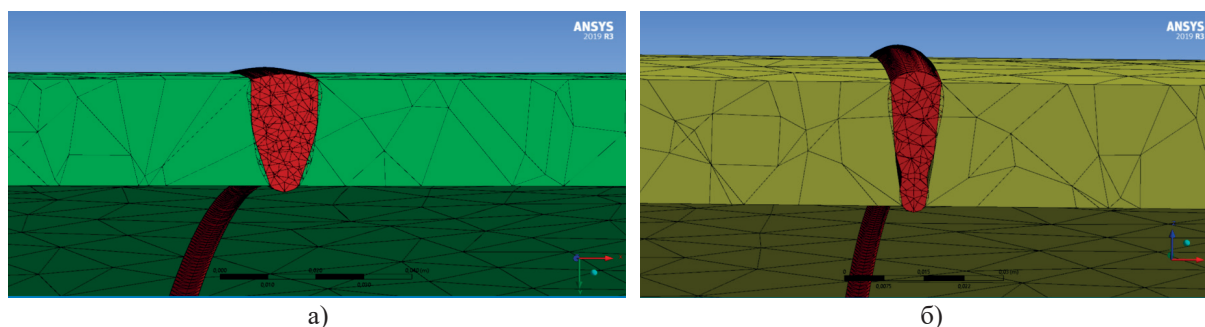
Чтобы адекватно оценить надежность сварных стыков по технологии ЛС и их напряженно-деформированное состояние при эксплуатационных условиях, необходимо провести их испытания при нагружении с помо-

щью моделирования (в программных комплексах), а также опытным путем.

Для сравнения и оценки надежной эксплуатации МГ со сварными стыками, в программном комплексе ANSYS среде Mechanical смоделированы сварные кольцевые соединения, выполненные автоматической сваркой CRC-Evans (рисунок, 3 а) и технологией ЛС (рисунок, 3 б). Исходные данные участка МГ, для которого осуществлялось построение моделей, приведены в таблице 2, алгоритм моделирования принят согласно исследованию [8].

Таблица 1. Полученные рабочие параметры сварки**Table 1.** Obtained welding performance parameters

Параметры сварки сварочным комплексом «CRC-Evans»				
Параметры	Наименование слоя шва			
	Горячий проход	Заполняющий	Облицовочный	
Скорость подачи проволоки, см/мин	936	845	624	
Вылет электрода, мм	11	14	17	
Напряжение на дуге, В	25	22	18	
Скорость сварки, см/мин	123	71	46	
Параметры лазерной сварки установкой «УЛСТ-1»				
Параметры	Наименование слоя шва			
	Корневой	Корректирующий	Заполняющий	Облицовочный
Скорость подачи проволоки, см/мин	350	–	420	500
Вылет электрода, мм	7	11	14	9
Мощность лазерного излучения, кВт	4,5	3,5	5,8	8,0
Скорость сварки, см/мин	60	60	60	60



а)

б)

а) автоматическая сварка CRC-Evans; б) технология ЛС

а) automatic welding CRC-Evans; б) DP technology

Рисунок 3. Видовой разрез конечно-элементной сетки модели участка газопровода со сварным швом**Figure 3.** View section of finite element grid of welded gas pipeline section model**Таблица 2.** Исходные данные**Table 2.** Input data

Параметр		CRC-Evans	УЛСТ-1
Диаметр трубы D, мм		1420	
Толщина стенки δ , мм		25	
Длина модели трубы L, мм		4000	
Марка стали (класс прочности)		17Г1С (K60)	
Свойства основного металла трубы	Предел прочности σ_B , МПа	590	
	Предел пластичности $\sigma_{0,2}$, МПа	480	
Свойства металла сварного шва	Предел прочности σ_B , МПа	600	712
	Предел пластичности $\sigma_{0,2}$, МПа	500	617

Для рассматриваемого участка МГ с представленными моделями сварных соединений определено число проходов сварного шва и рассчитана общая площадь поперечного сечения наплавленного металла 1 [7] исходя из геометрических размеров разделок кромок труб, представленных на рисунках 4–5 (1):

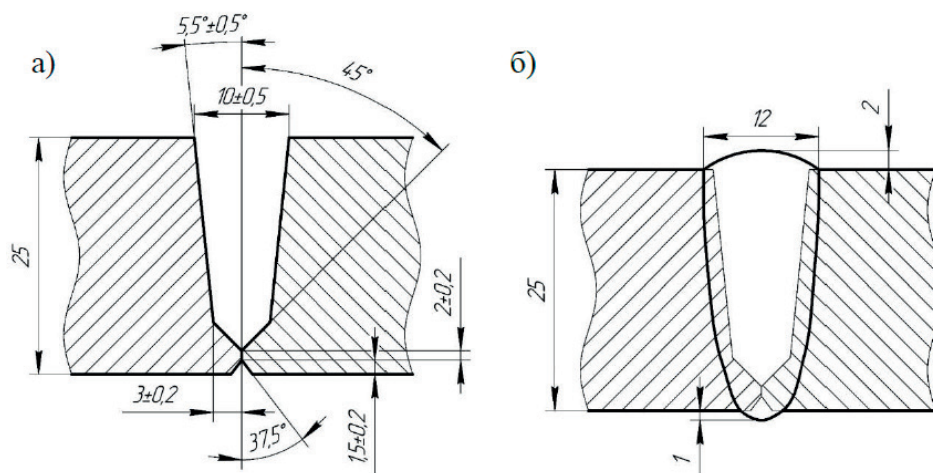
$$F_{\text{CRC/ЛС}} = E^2 \cdot \text{ctg} \beta + \frac{e^2}{2} \text{ctg} \alpha + E^2 \cdot \text{ctg} \frac{\alpha}{2} + n \cdot \left(S - E - \frac{\alpha}{2} - \frac{e}{2} \cdot \text{ctg} \alpha \right) + h \cdot g, \quad (1)$$

где E — толщина корня шва, мм; α — угол разделки кромки, град; β — угол разделки

основания шва, град; e — ширина шва, мм; b — ширина основания шва, мм; S — толщина стенки трубы, мм; h — выпуклость шва, мм; g — глубина провара, мм.

Площадь поперечного сечения сварного шва и объем наплавленного металла в случае использования технологии лазерной сварки в три раза меньше. Таким образом, число проходов для каждого метода: «CRC-Evans» — 6 проходов, лазерная сварка установкой «УЛСТ-1» — 4 прохода.

При моделировании геометрия модели выстраивалась на основе трех тел вращения. Создаются материалы основного металла

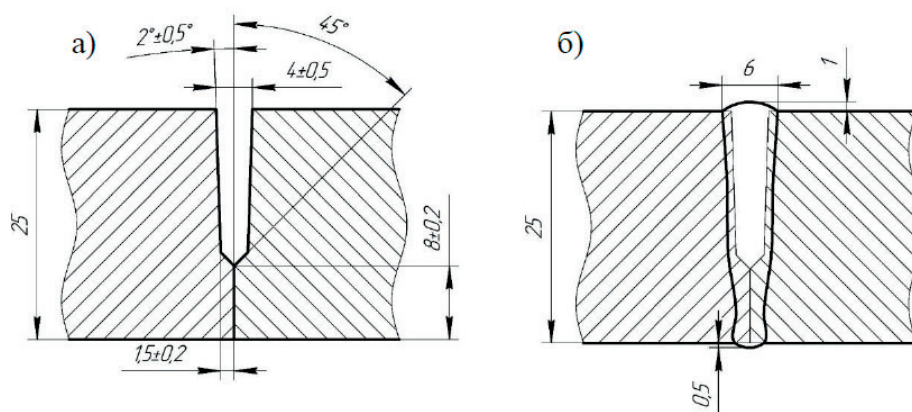


а) разделка кромок; б) поперечное сечение сварного шва

a) edge preparation; b) cross-section of the weld

Рисунок 4. Схема разделки кромок CRC-Evans

Figure 4. CRC-Evans edge preparation diagram



а) разделка кромок; б) поперечное сечение сварного шва

a) edge preparation; b) cross-section of the weld

Рисунок 5. Схема разделки кромок для сварки труб по технологии ЛС

Figure 5. Edge preparation diagram for pipe welding using DP technology

трубы Pipe и металла сварного шва Weld, задаются пределы прочности и пластичности для данных материалов по исходным данным.

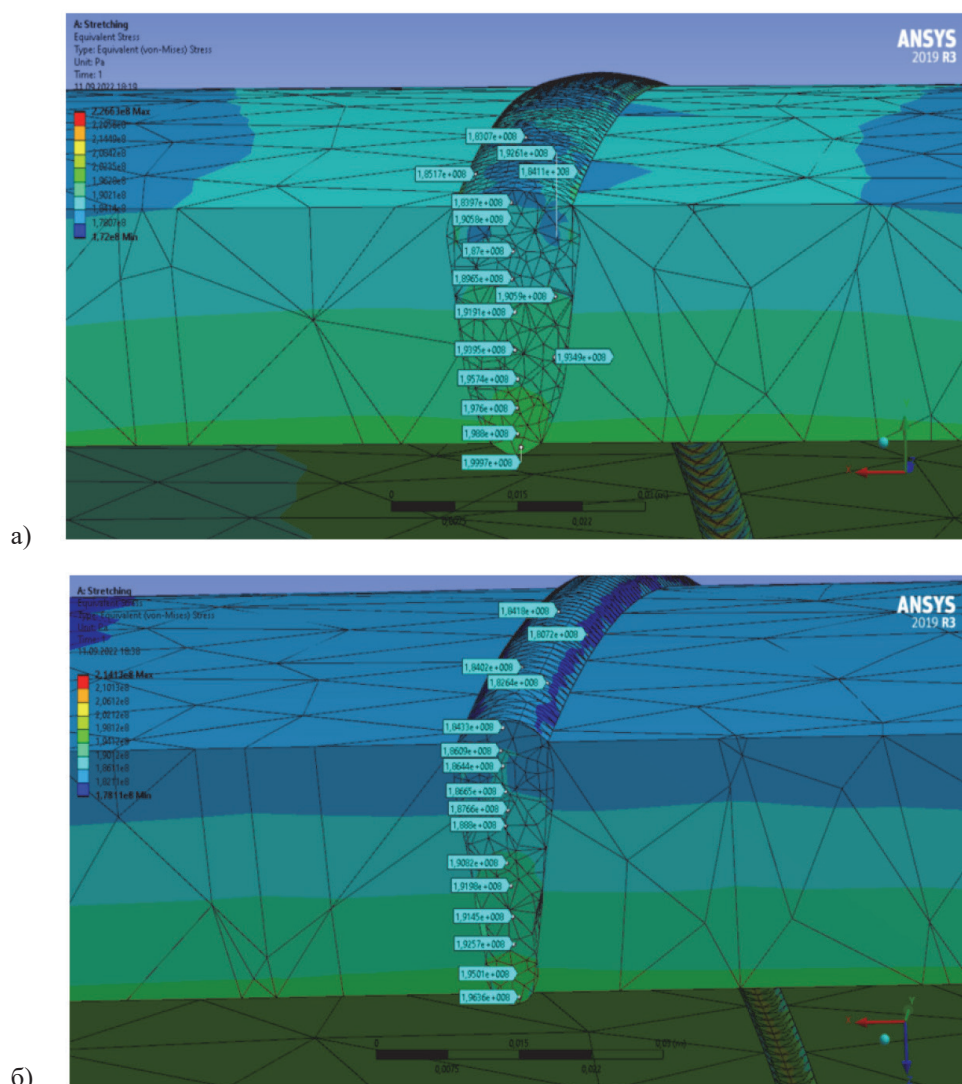
Создается связь между телами — одно контактное и два связываемых тела. Строится сетка всей модели с заданным размером единичной ячейки, а также дополнительная уточняющая сетка для тела сварочного шва с более мелким размером ячейки.

Прикладываются нагрузки от внутреннего давления и внешних воздействующих сил, а также ограничения в виде эластичной опоры или фиксированной опоры.

На участок модели трубы со сварным швом были наложены нагрузки, имитирующие рас-

тяжение участка, которое происходит в случае тепловых деформаций при эксплуатации. Нагрузки от этих деформаций были приложены строго по оси газопровода. Для уточнения модели была добавлена нагрузка от внутреннего давления и воздействие, имитирующее грунт. На рисунке 6 представлены приложенные нагрузки и воздействия, а также результаты расчета в разрезе поперечного сечения швов.

Далее приложили нагрузки, имитирующие сжатие участка газопровода, которое проявляется в случае температурных деформаций. Результаты воздействий представлены в разрезе поперечного сечения швов на рисунках 7, а, б.



а) автоматическая сварка CRC-Evans; б) технология ЛС

a) CRC-Evans automatic welding; b) DP technology

Рисунок 6. Видовой разрез модели с результатом приложения нагрузок при моделировании воздействий от растяжения участка трубы со сварным швом

Figure 6. Model view section resulting from applying loads when modeling the tensile effects of a welded pipe run

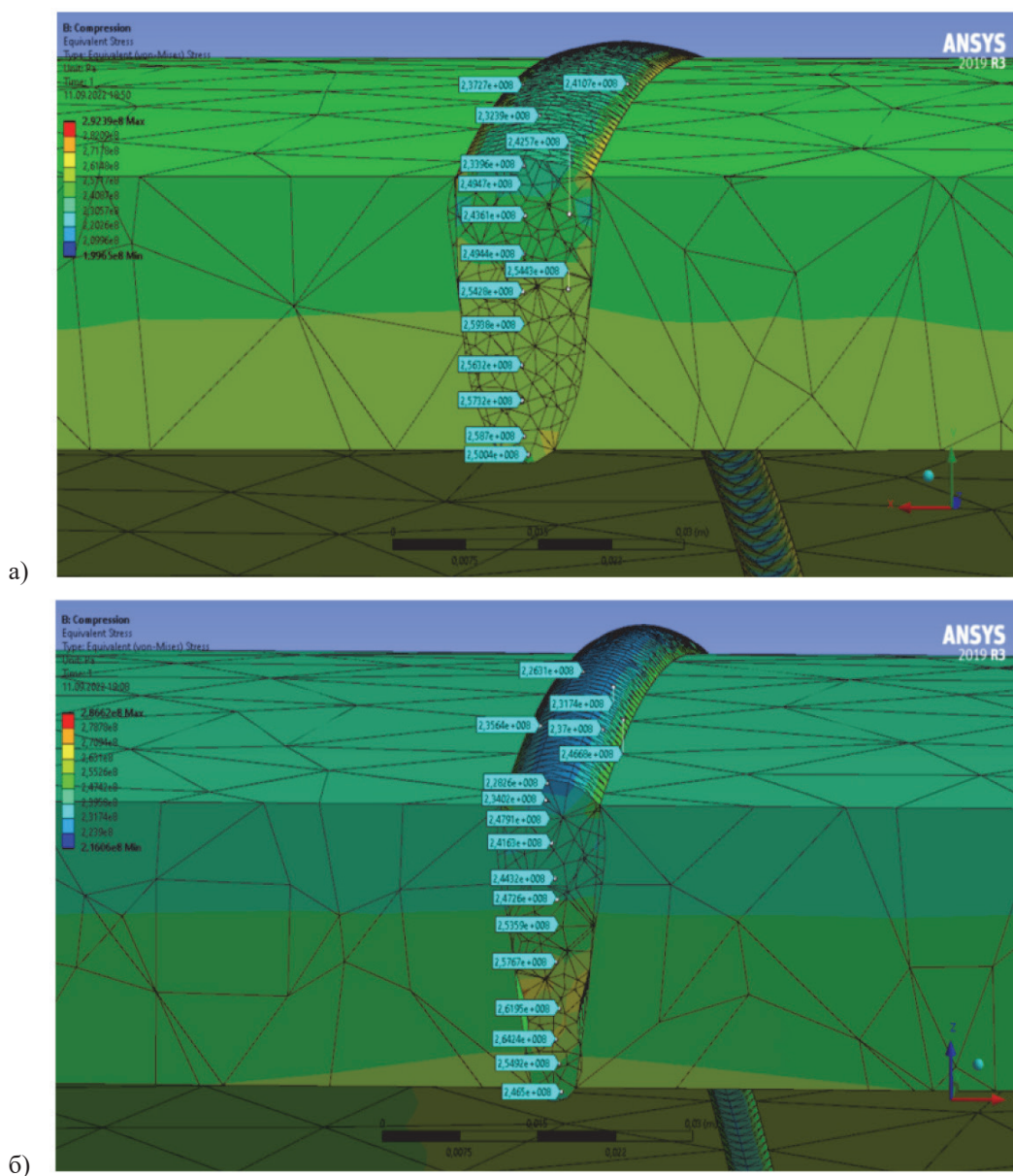


Рисунок 7. Видовой разрез модели с результатом приложения нагрузок при моделировании воздействий от сжатия участка трубы со сварным швом

Figure 7. View section of the model with the result of applying loads when modeling the effects of compression of a pipe section with a weld

На третьем этапе моделирования приложили нагрузки, которые реализуют изгиб участка газопровода, что случается при просадке грунта основания (рисунки 8, а, б).

Нагрузки от этих деформаций были приложены строго перпендикулярно оси газопровода. Концы модели были зафиксированы от всех перемещений. Также была добавлена нагрузка от внутреннего давления и воздействие гравитационного поля Земли.

По результатам трех этапов моделирования можно отметить следующее: значения напряжений в сечении сварного соединения, полученного методом лазерной сварки меньше, чем в сечении сварного соединения, полученного автоматической сваркой CRC-Evans.

Результаты испытаний при моделировании по двум технологиям сварки приведены в таблице 3 и отображены графически на рисунке 9.

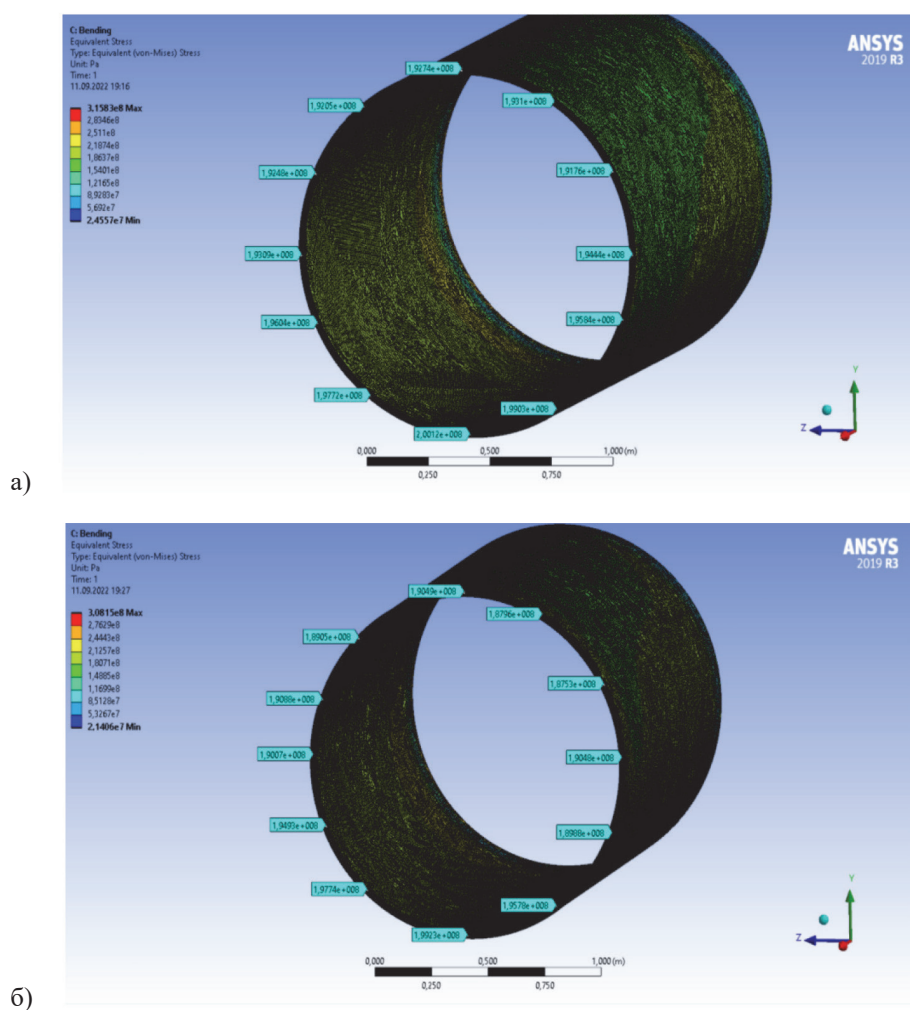


Рисунок 8. Видовой разрез модели с результатом приложения нагрузок и воздействий

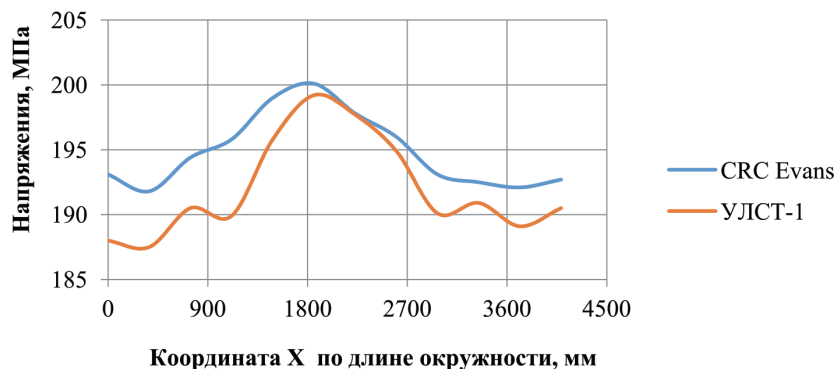
Figure 8. Model view section resulting from loads and impacts

Таблица 3. Распределение напряжений в продольном сечении сварных соединений по 3 видам испытаний

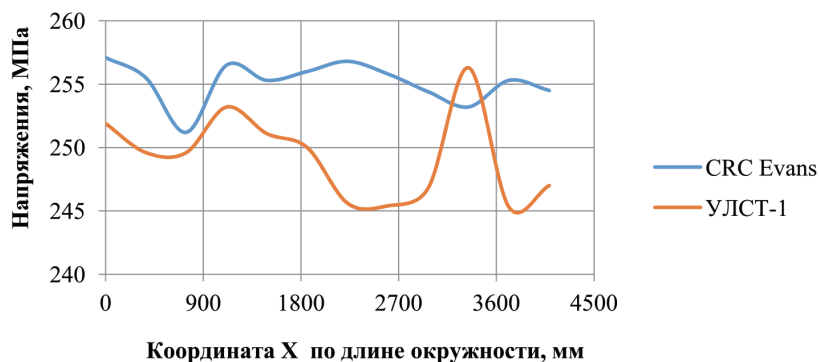
Table 3. Distribution of stresses in the longitudinal section of welded joints by three types of tests

Виды свароч- ных технологий	Величина напряжений в сечении сварного шва по часовой ориентации, МПа											
	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Растяжение												
CRC-Evans	193,7	191,1	189,6	193,1	191,9	191,6	191,1	189,3	189,6	191,8	189,7	188,5
УЛСТ-1	187,4	186,6	188,1	187,8	190,1	191,7	190,8	187,6	186,1	184,7	188,4	190
Сжатие												
CRC-Evans	257,1	255,5	251,2	256,5	255,3	256	256,8	255,8	254,4	253,2	255,3	254,5
УЛСТ-1	251,9	249,6	249,6	253,2	251,1	250	245,6	245,4	246,8	256,3	245,3	247
Изгиб												
CRC-Evans	193,1	191,8	194,4	195,8	199	200,1	197,8	196	193,1	192,5	192,1	192,7
УЛСТ-1	188	187,5	190,5	189,9	195,8	199,2	197,7	194,9	190,1	190,9	189,1	190,5

Изгиб



Сжатие



Растяжение

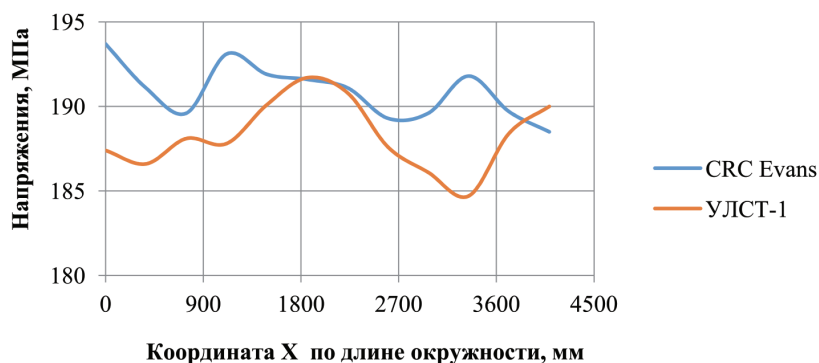


Рисунок 9. Графики зависимости возникающих напряжений в сварных швах по двум технологиям сварки

Figure 9. Weld stress curves for two welding techniques

Полученные данные объясняются совместным воздействием электрической дуги и лазера при гибридной лазерной сварке. Обеспечивается высокий уровень механических свойств и упрочнение шва.

Выводы

1. На основании проведенного анализа существующих методов сварки очевидна эффективность лазерной технологии, которая обе-

спечивает высокую производительность при низком потреблении энергии и затрат на использование и техническое обслуживание.

2. Рассмотрены особенности лазерной технологии сварки и современное оборудование, которое может быть использовано для сварки кольцевых стыков трубопроводов при строительстве, реконструкции и капитальном ремонте труб $\varnothing 720-1420$ мм, с толщиной стенки от 12–38 мм, классом прочности K54-K60.

3. По результатам моделирования установлено, что при проведении механических испытаний сварных стыков, значения напряжений в сечении сварного соединения, получен-

ного лазерной сваркой комплексом УЛСТ-1 меньше, чем в сечении сварного соединения, выполненного сварочным комплексом CRC-Evans.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. СТО Газпром 2-2.2-136-2007. Инструкция по технологиям сварки при строительстве и ремонте промысловых и магистральных газопроводов. Часть 1: издание официальное // ОАО «Газпром». 247 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/a15/4293832912.pdf> (дата обращения: 20.06.2023).

2. Технологическая инструкция по автоматической лазерной сварке неповоротных кольцевых стыковых соединений газопроводов установкой «УЛСТ-1» // ООО «Газпром ВНИИГАЗ»; ПАО «Газпром»; ООО «НПК «УТС Интеграция». Москва, 2017. 41 с.

3. Шамов Е.М. Технология и оборудование многослойной лазерной сварки неповоротных стыков труб большого диаметра для магистральных трубопроводов: дис. ... канд. техн. наук. М: МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2019. 169 с.

4. Ефименко Л.А., Капустин О.Е., Уткин И.Ю., Деркач А.П., Шамов Е.М., Бегунов И.А., Горский А.И. Особенности формирования структуры и механических свойств при лазерной сварке неповоротных стыков труб // Сварочное производство. 2018. № 10. С. 18–24.

5. Ушаков А.Б., Морозова О.П., Бегунов И.А., Шамов Е.М., Орешкин А.А., Вышемирский Е.М. Технология лазерной сварки магистральных трубопроводов // Газовая промышленность. 2017. № S2 (754). С.100-107.

6. Шамов Е.М., Бегунов И.А., Васильев А.А., Шелестова А.К., Иванисов Д.В., Орешкин А.А., Мишин М.А. Лазерная сварка толстостенных стальных труб в потолочном положении // Сварочное производство. 2018. № 8. С. 32–36.

7. Ерохин А.А., Антропова Н.А. Разработка мероприятий по снижению эксплуатационных рисков на магистральных газопроводах при проведении ремонтно-восстановительных работ с использованием лазерной сварки: магистерская диссертация. Томск, 2020. 94 с.

8. Ефименко Л.А., Капустин О.Е., Уткин И.Ю., Деркач А.П., Шамов Е.М., Бегунов И.А., Горский А.И. Особенности формирования структуры и механических свойств при лазерной сварке неповоротных стыков труб // Сварочное производство. 2018. № 10. С. 18-24.

9. Чубуков И.А. Разработка способа лазерной сварки конструкционных сталей в щелевую разделку с подачей присадочной проволоки.: дис. ... канд. техн. наук. М: 1989. 186 с.

10. Шелягин В.Д., Хаскин В.Ю. Тенденции развития лазерно-дуговой сварки // Автоматическая сварка. 2002. №6. С.28-32.

11. Tarasov, S.Y., Vorontsov, A.V., Fortuna, S.V. [et al.]. Ultrasonic-assisted laser welding on AISI 321 stainless steel // Welding in the World. 2019. No. 63. P. 875–886. DOI: 10.1007/s40194-019-00716-1.

REFERENCES

1. STO Gazprom 2-2.2-136-2007. Instruksiya po tekhnologiyam svarki pri stroitel'stve i remonte promyslovyh i magistral'nyh gazoprovodov. CHast' 1: izdanie oficial'noe [Instructions on Welding Technologies for Construction and Repair of Field and Trunk Gas Pipelines. Part 1: official edition]. *OAO Gazprom*. 247 p. Available at: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/a15/4293832912.pdf> (accessed: 20.06.202). [in Russian].

2. *Tekhnologicheskaya instrukciya po avtomaticheskoy lazernoj svarke nepovorotnyh kol'cevyyh stykovykh soedinenij gazoprovodov ustanovkoj «ULST-1»* [Process Instruction for Automatic Laser Welding of Non-Rotating Annular Butt Joints of Gas Pipelines by the ULST-1 Unit]. *Gazprom VNIIGAZ LLC; PJSC Gazprom; LLC «NPK» UTS Integration*. Moscow, 2017. 41 p. [in Russian].

3. Shamov E.M. *Tekhnologiya i oborudovanie mnogoslojnoj lazernoj svarki nepovorotnyh stykov trub bol'shogo diametra dlya magistral'nyh truboprovodov: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Technology and Equipment of Multilayer Laser Welding of Non-Rotating Joints of Large-Diameter Pipes for Main Pipelines: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Moscow: Moscow State Technical University named after N.E. Bauman. 2019. 169 p. [in Russian].

4. Efimenko L.A., Kapustin O.E., Utkin I.Yu., Derkach AP, Shamov EM, Begunov I.A., Gorsky A.I. *Osobennosti formirovaniya struktury i mekhanicheskikh svoystv pri lazernoj svarke nepovorotnyh stykov trub* [Features of Structure Formation and Mechanical Properties During Laser Welding of Non-Rotary Joints of Pipes]. *Svarochnoe proizvodstvo — Welding production*, 2018, No. 10, pp. 18–24. [in Russian].

5. Ushakov A.B., Morozova O.P., Begunov I.A., Shamov E.M., Oreshkin A.A., Vyshemirsky E.M. *Tekhnologiya lazernoj svarki magistral'nyh truboprovodov* [Laser Welding Technology of Trunk Pipelines]. *Gazovaya promyshlennost' — Gas industry*, 2017, No. S2 (754), pp.100-107. [in Russian].

6. Shamov E.M., Begunov I.A., Vasiliev A.A., Shelestova A.K., Ivanisov D.V., Oreshkin A.A., Mishin M.A. *Lazernaya svarka tolstostennykh stal'nykh trub v potolochnom polozhenii* [Laser Welding of Thick-Walled Steel Pipes in The Ceiling Position]. *Svarochnoe proizvodstvo — Welding production*, 2018, No. 8, pp. 32–36. [in Russian].

7. Erokhin A.A., Antropova N.A. *Razrabotka meropriyatij po snizheniyu ekspluatatsionnyh riskov na magistral'nyh gazoprovodah pri provedenii remonto-vosstanovitel'nyh rabot s ispol'zovaniem lazernoj svarki: masterskaya dissertatsiya* [Development of Measures to Reduce Operational Risks on Trunk Gas Pipelines During Repair and Restoration Work Using Laser Welding: Master's Thesis]. Tomsk, 2020. 94 p. [in Russian].

8. Efimenko L.A., Kapustin O.E., Utkin I.Yu., Derkach AP, Shamov EM, Begunov I.A., Gorsky A.I. Osobennosti formirovaniya struktury i mekhanicheskikh svoystv pri lazernoj svarke nepovorotnykh stykov trub [Features of Structure Formation and Mechanical Properties During Laser Welding of Non-Rotary Joints of Pipes]. *Svarochnoe proizvodstvo — Welding production*, 2018, No. 10, pp. 18-24. [in Russian].

9. Chubukov I.A. Razrabotka sposoba lazernoj svarki konstrukcionnykh stalej v shchelevuyu razdelku s podachej prisadochnoj provoloki.: dis. ... kand. tekhn. nauk

[Development of a Method for Laser Welding of Structural Steels into Slit Cutting with The Supply of Filler Wire: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Moscow, 1989, 186 p. [in Russian].

10. Shelyagin V.D., Haskin V.Y. Tendencii razvitiya lazerno-dugovoj svarki [Trends in the Development of Laser-Arc Welding]. *Avtomaticheskaya svarka — Automatic welding*, 2002, No. 6. pp. 28-32. [in Russian].

11. Tarasov, S.Y., Vorontsov, A.V., Fortuna, S.V. [et al.]. Ultrasonic-assisted laser welding on AISI 321 stainless steel. *Welding in the World*, 2019, No. 63, pp. 875–886. DOI: 10.1007/s40194-019-00716-1.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Екатерина Владимировна Семиткина, кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация магистральных газонефтепроводов», Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Россия

Ekaterina V. Semitkina, candidate of technical sciences, associate professor, Design and operation of trunk gas and oil pipelines department, Ukhta state technical university, Ukhta, Russia

ekaterina-semitkina@mail.ru

Марина Владимировна Терентьева, кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация магистральных газонефтепроводов», Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Россия

Marina V. Terent'eva, candidate of technical sciences, associate professor, Design and operation of trunk gas and oil pipelines department, Ukhta state technical university, Ukhta, Russia

marina_tufyakova@mail.ru

Владимир Орович Некучаев, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика и химия», Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Россия

Vladimir O. Nekuchaev, doctor of physics and mathematics sciences, professor, head of the Physics and chemistry department, Ukhta state technical university, Ukhta, Russia

ninanek@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 05.07.2023; одобрена после рецензирования 08.08.2023; принята к публикации 30.09.2023.

The article was submitted 05.07.2023; approved after reviewing 08.08.2023; accepted for publication 30.09.2023.