

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ, МЕХАНОХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ФОРМЫ СВАРНОГО ШВА, ВЫПОЛНЕННОГО ЛАЗЕРНОЙ СВАРКОЙ

RESEARCH OF THE STRUCTURE, MECHANOCHEMICAL CHARACTERISTICS AND SHAPE OF A WELD SEAM PERFORMED BY LASER WELDING

А. М. Файрушин
Airat M. Fayrushin

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Р. Ф. Тукаев
Raul F. Tukaev

ООО «Сервисная компания
«ПетроАльянс»,
г. Нефтеюганск,
Российская Федерация

PetroAlliance Services
Company Ltd,
Nefteyugansk, Russian Federation

И. З. Аллабердин
Ilnur Z. Allaberdin

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

В работе рассмотрен вопрос в эффективности замены дуговой сварки на лазерную при изготовлении трубных пучков кожухотрубчатых теплообменных аппаратов. Исследованы структуры, механические и химические характеристики сварного соединения труб с трубной решеткой, при использовании лазерной и дуговой сварки. Представлены графики и данные состава и состояния швов. Показаны фотографии полученных образцов с помощью микроскопа Zeiss EVO MA 10 после лазерной и дуговой сварки. Результаты показали, что при использовании лазерной сварки структура сварного соединения более однородна как по размеру, так и по химическому составу.

The paper considers the issue of the efficiency of replacing arc welding with laser welding in the manufacture of tube bundles of shell-and-tube heat exchangers. The structures, mechanical and chemical characteristics of the welded joint of pipes with a tube sheet, using laser and arc welding, have been investigated. The graphs and data of the composition and condition of the seams are presented. There are shown photographs of the samples obtained using a Zeiss EVO MA 10 microscope after laser and arc welding. The results showed that when using laser welding, the structure of the welded joint is more uniform both in size and in chemical composition.

На сегодняшний день технология сварки трубных пучков в нефтегазовом машиностроении регламентирует применение для стали 15×5М только дуговые способы сварки. Данные способы идут с большими тепловложениями, что приводит к нерегламентированному прогибу трубной решетки, низкой производительности и требуют значительных затрат.

По данным экспериментов, проведенных профессором А.Г. Халимовым и др. исследователями [1], можно сказать, что околшовные зоны данных сталей характеризуются большой твердостью 380–409 HV. Наличие участков с высокой твердостью при возника-

ющих остаточных сварочных напряжениях обусловлено незамедлительным проведением термической обработки.

Главная причина разрушения соединений из сталей типа 15×5М состоит в нарушении технологий режима сварки и несоблюдении непрерывного процесса «сварка — термообработка». Также отрицательным фактором является наличие так называемых «слипшихся» трещин, которые трудно выявить процессами неразрушающего контроля.

В труде А.Г. Халимова [2] показано, что сварные соединения из жаропрочных сталей нашего исследуемого типа имеют явную выраженную механическую неоднородность.

Ключевые слова

сварка; лазерная сварка; дуговая сварка; трубная решетка; сталь 15×5М; шов; трубный пучок

Key words

welding; laser welding; arc welding; tube sheet; steel 15×5M; seam; tube bundle

Причина данной неоднородности связана с его структурой, которая состоит в том, что основной металл и сварной шов, а также зоны термического влияния обладают различными механическими свойствами.

Данные разрушений свидетельствуют, что повреждения, как правило, появляются в перенапряженных областях конструктивных элементов. Одна из главных причин преждевременного хрупкого разрушения конструкций из сталей (15×5М) заключается в образовании развитых закаленных участков (твердых прослоек) в сварных соединениях.

Таким образом, в процессе использования сварных соединений этих сталей, склонных к закаливанию, имеются в околошовных зонах большие хрупкие прослойки и по зонам сплавлений различные зародышевые дефекты. Данные дефекты, выявляющиеся как микротрещины и микронадрывы, могут привести к преждевременному разрушению стыков. Есть возможность разрушения выше в стыках с конструктивными и технологическими концентраторами напряжений.

Для обеспечения лучшего сваривания соединений из сталей 15×5М нужно убрать негативное влияние твердых структурных образований. Наличие таких протяженных участков металла с высокой твердостью и остаточными напряжениями в локальных микроразмерах закаленной структуры вызывает необходимость в снятии остаточных напряжений при помощи термической обработки либо другими способами из соображений технологической и эксплуатационной прочности.

Одним из таких решений может послужить использование лазерной сварки. Лазерная сварка помогает снизить уровень остаточных напряжений, но уменьшает прогиб трубной решетки и негативно сказывается на прочности и надежности конструкции, а также является эффективным технологическим процессом и не требует использования присадочных материалов.

Использование лазерной сварки при создании сварного трубного пучка приводит к существенному снижению внутреннего напряжения в зоне термического влияния, что позволит повысить работоспособность соединений в условиях циклического нагружения.

Одна из целей при сварке хромомолибденовых сталей — получить уменьшение ширины шва и зоны термического воздействия, этого легко можно добиться при использова-

нии лазерных технологий. Это поможет увеличить глубину проплавки, с помощью чего мы получим соединение более прочное, чем при обычной дуговой сварке.

Технология сварки узла «труба — трубная решетка» при использовании стали 15×5М и подобных сталей жаропрочного класса с мартенситной структурой сложна и трудоемка в создании. Используется технология дуговой сварки в виде аргонодуговой сварки. Сложности появляются при создании сварки трубного пучка. Слабая технологическая прочность этой стали к закалочным трещинам создает трудность в процессе сварки. В зоне термического влияния и околошовной зоне образуются твердые прослойки, которые устраняются после предварительного и сопутствующего подогрева при температуре 300–350 °С и дальнейшего высокотемпературного отпуска при температуре 740–760 °С.

Для увеличения технологической прочности, а также уменьшения трудоемких затрат и повышения качества нами проведены исследования по присоединению труб к трубной решетке при помощи лазерной сварки.

Для изучения свойств сварного соединения из стали 15×5М и выработки пробной технологии получения сварного узла, выполненного способом лазерной сварки, была произведена сварка заготовки из стали 15×5М, имитирующей данный узел в натурную величину (рисунок 1) [3, 4]. Сварка производилась на торцевой поверхности заготовки, без присадочного материала, по окружности предварительно развальцованной трубки (глубина проплавления ~5 мм, диапазон скоростей 2–5 м/мин).

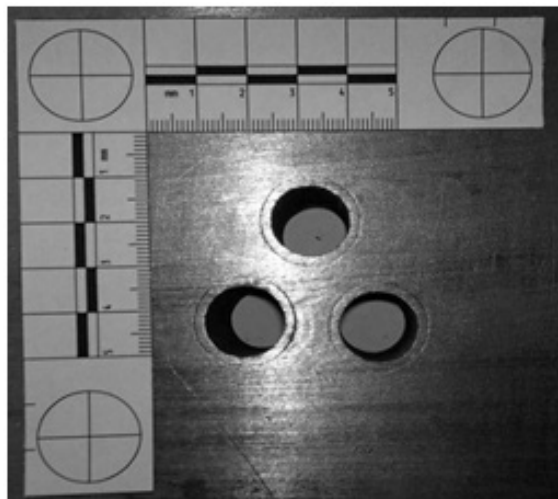
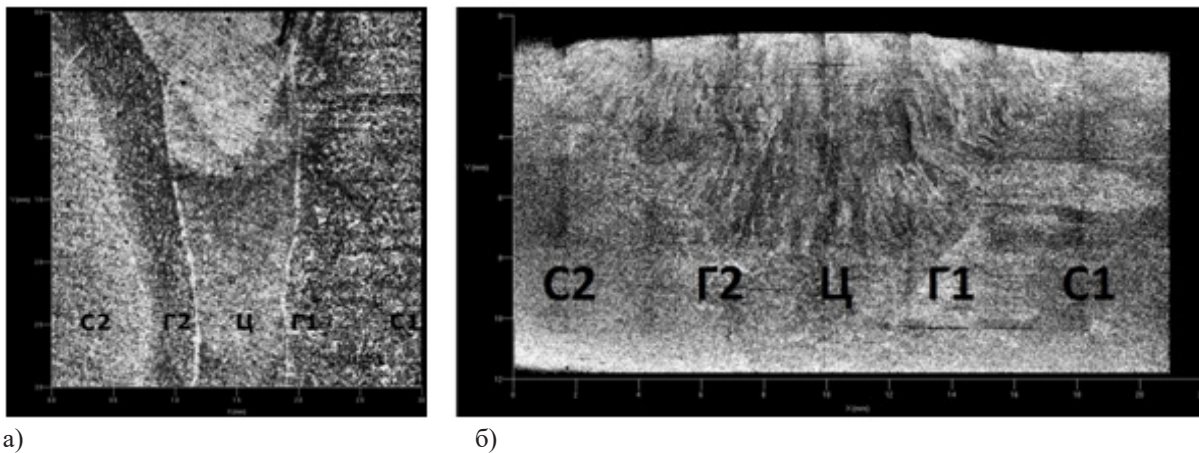


Рисунок 1. Заготовка из стали 15×5М

После сварки исследуемая заготовка была разрезана на несколько образцов. Полученные образцы сварного соединения были подготовлены в соответствии с требованиями к поверхности для последующего анализа микроструктуры. Для сравнительного анализа таким

же образом был подготовлен образец аналогичного сварного соединения из стали 15×5М, полученного по технологии с использованием электродуговой сварки с предварительным подогревом до температуры 300–350 °С (рисунок 2).



а) лазерная сварка; б) дуговая сварка с предварительным подогревом (300–350 °С) и последующей термообработкой (750 °С, 2 ч)

С2 — зона металла трубной решетки; Г2 — зона термического влияния между сварным швом и металлом решетки; Ц — зона сварного шва; Г1 — зона термического влияния между сварным швом и металлом трубки; С1 — зона металла трубки

Рисунок 2. Макрофотография сварного шва (поперечный разрез)

В зоне нагрева происходят фазовые и структурные изменения, которые включают в себя: растворение карбида, преобразование аустенита, превращение аустенита в мартенсит при охлаждении. Отвод тепла из зоны сварки позволяет регулировать перераспределение углерода и карбидообразующих компонентов (хрома, молибдена) между твердым раствором и фазами выделения, чем достигается формирование мелкозернистой, равновесной структуры бейнитного характера с минимальной чувствительностью к образованию трещин.

Форма шва имеет выраженный «кинжальный» характер, присущий варке лазерным лучом. Качество металла шва на всем протяжении исследуемого участка является однородным, с малым размером зон термического влияния.

Подготовку образцов к металлографическому анализу проводили в соответствии с общеизвестными рекомендациями шлифованием с последующим полированием.

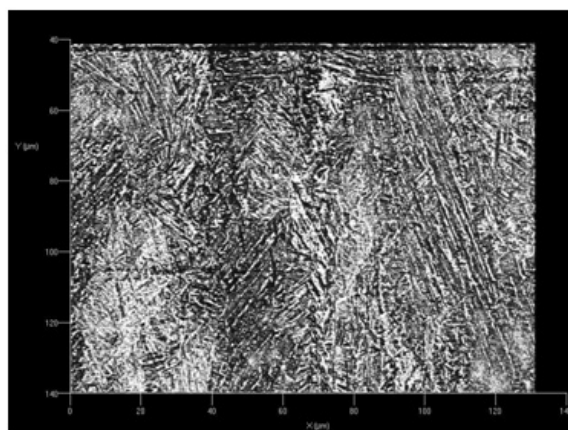
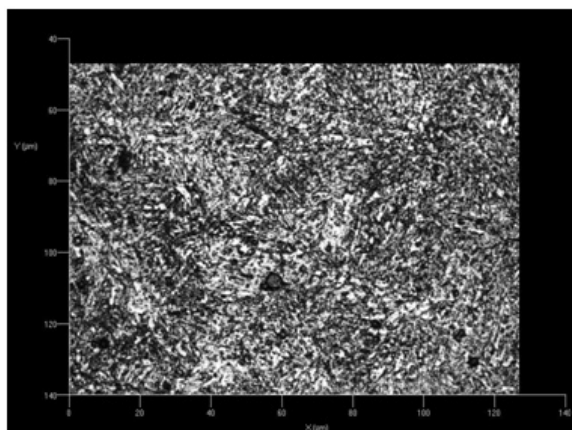
Травление, для выявления структуры, выполняли в 5%-ом растворе азотной кислоты в этиловом спирте в течение 3 мин при напряжении 10 В и силе тока 0,1 А. Съемку поверхности осуществляли на конфокальном лазерном ска-

нирующем микроскопе «LSM-5-Exciter». При съемке использовали объективы с разным увеличением от 5 до 100 крат. Данный набор объективов обуславливает широкий спектр масштабных уровней (макро-, мезо-, микро- и нано-).

При исследовании структуры снимков образцов была обнаружена мелкозернистая структура шва, проваренная лазерной сваркой, имеющая большую дисперсность, обладающая сходством с бейнитной (рисунок 3), но при этом не имеет особого выраженного направленного роста зерен шва в сравнении с электрической дугой. Зерно не удлиненное, имеющее повышенную дисперсность, характеризующую сравнительно маленькими размерами.

В таблице 1 приведены данные анализа размера зерна на срезе сварного шва, полученного лазерной сваркой.

Измерение микротвердости по методу Виккерса проводили на микроскопе «Axiovert-100A» (Carl Zeiss, Germany) с интегрированной приставкой «МНТ-10», вдоль центральной линии сварного шва, при скорости нагружения $v = 50$ г/с. Нагрузка составляла $P = 100$ г при времени выдержки под нагрузкой 10 с.



а)

б)

а) лазерная сварка; б) дуговая сварка по существующей технологии дуговой сварки с предварительным подогревом (300–350°C) и последующей термообработкой (750 °С, 2 ч)

Рисунок 3. Микроструктура металла сварного шва

Таблица 1. Данные анализа размера зерна на разрезе сварного шва, полученного лазерной сваркой, мкм

Параметры зерна	Зоны				
	С2	Г2	Ц	Г1	С1
Минимальный	3,4	1,1	1,1	3,3	3,3
Максимальный	32,3	36,8	18,6	47,4	38,1
Среднее значение по занимаемой площади	5,5	2,4	1,9	6,8	6,3

Результаты замеров микротвердости представлены в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, твердость не удовлетворяет регламентным значениям, и необходимо применить последующую термообработку.

Образцы были подвергнуты нагреву до нужной температуры, выдержке при данной

температуре в течение 2 ч и последующем его охлаждении на воздухе.

После проводили замеры микротвердости по Виккерсу на микротвердомере ПМТ-3М при скорости нагружения $v = 50$ г/с, нагрузке $P = 200$ г и времени выдержки под нагрузкой $t = 15$ с. Результаты определения микротвердости представлены в таблице 3.

Таблица 2. Данные замеров микротвердости по Виккерсу (HV) в разных областях сварного шва

Лазерная сварка	Зона	С2	Г2	Ц	Г1	С1
	HV, МПа		1711	3471	3207	3271
Дуговая сварка с подогревом и термообработкой	Зона	С2	Г2	Ц	Г1	С1
	HV, МПа		1573	1703	2076	2043

Таблица 3. Данные замеров микротвердости по Бринеллю (HB) в разных областях сварного шва, полученного путем лазерной сварки после термообработки

Зона	С2	Г2	Ц	Г1	С1
Температура ТО					
При 400 °С	301	409	443	409	185
При 600 °С	298	400	434	405	200
При 750 °С	190	212	225	185	180

В наше время сканирующий электронный микроскоп для изучения поверхности — незаменимый прибор при проведении анализа в каждой из областей исследования в материаловедении.

Для проведения анализа использовали Микроскопы Zeiss EVO MA 10, для рентге-

новской спектроскопии применили систему QUANTAX компании Bruker, которая помогает сделать качественный спектральный анализ. Результаты анализа представлены на рисунках 4–6.

Структура сварного шва, выполненного дуговой сваркой, показана на рисунке 5.

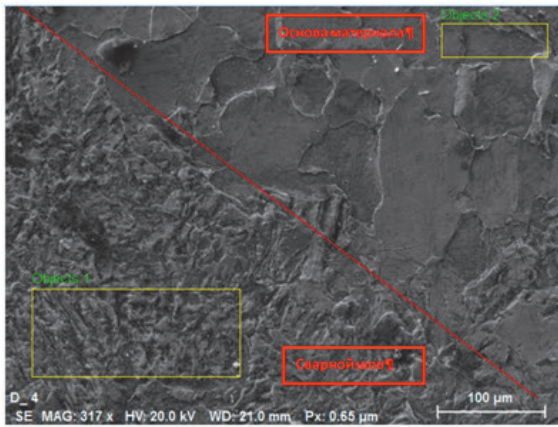


Рисунок 4. Структура сварного шва дуговой сварки

Сравнительный анализ химического состава показывает, что элементы включений находятся примерно в одинаковом процентном соотношении, что свидетельствует о равномерном составе образца.

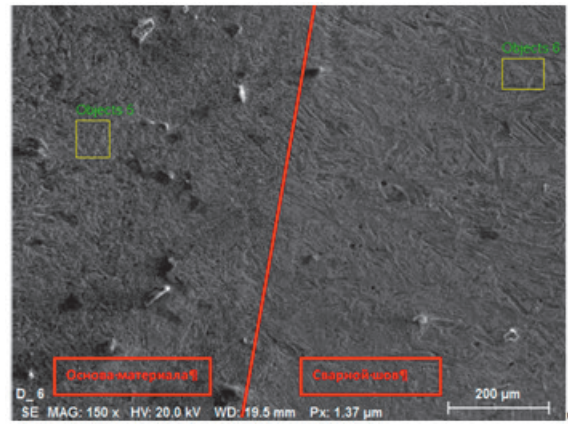
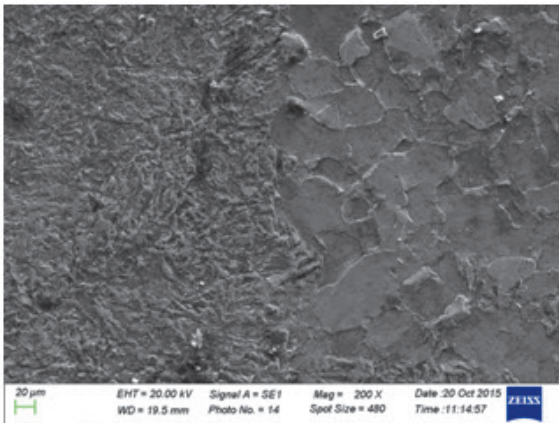
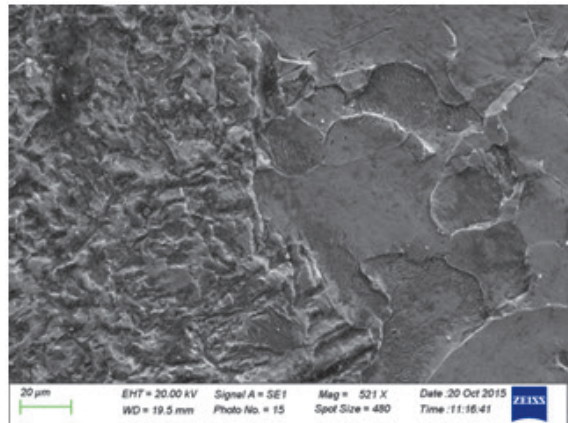


Рисунок 5. Структура сварного шва лазерной сварки

Для более наглядного сравнения структуры сварных соединений на рисунке 6 приведены фото образцов сварного шва, выполненного дуговой и лазерной сваркой.



а)



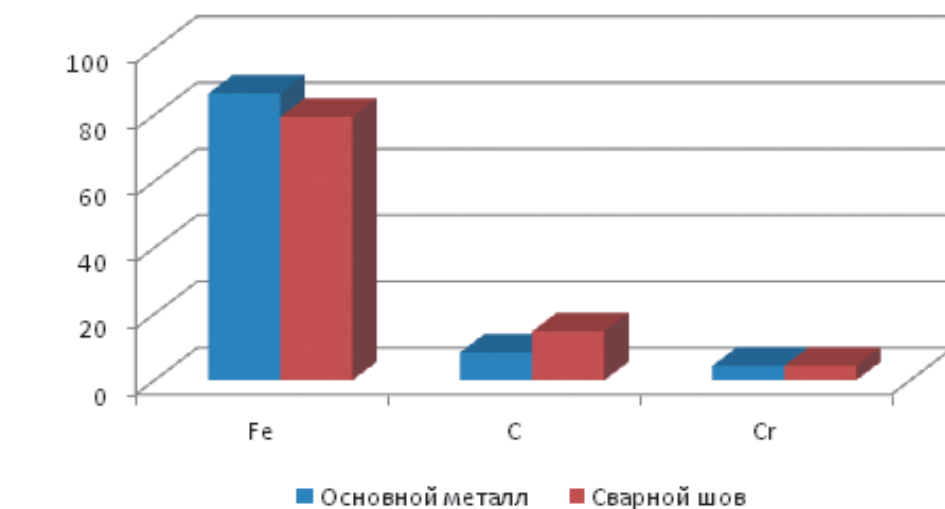
а) фото образцов сварного шва, полученного дуговой сваркой (значительная разница в структуре, четко видны границы между матрицей материала (справа) и сварным швом (слева))

б) фото образца сварного шва, полученного лазерной сваркой (разница в структуре еле различима, граница между матрицей материала (слева) и сварным швом (справа) размыта)

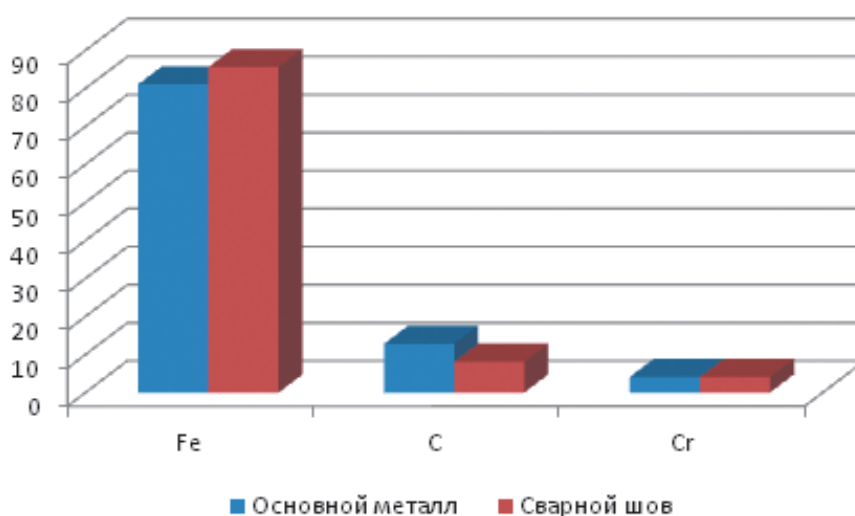
Рисунок 6. Фото образцов сварного шва, выполненного дуговой и лазерной сваркой

Для наглядного изображения изменения концентрации химических элементов в сварном шве и основном металле по трем основным элементам (Fe, C, Cr) на рисунке 7 представлены результаты спектрального анализа химического состава.

Как видно из представленных гистограмм, в случае использования лазерной сварки происходит меньшее науглероживание металла сварного шва, концентрация хрома при этом сохраняется.



а)



б)

а) изменение химического состава после дуговой сварки

б) изменение химического состава после лазерной сварки

Рисунок 7. Концентрация содержания Fe, C, Cr (%) в исследуемых образцах

Выводы

Результаты исследования механических характеристик и микроструктуры сварного шва показывают превосходство лазерной сварки при осуществлении сварного соединения труб с трубной решеткой. При использовании лазерной сварки возможна его автоматизация и высокая скорость сварки, что обеспечивает этой технологии возможность в реализации.

Проведенные выше исследования и анализы показывают, что микроструктура сварного соединения, выполненного лазерной сваркой, более однородна по размеру и составу частиц, чем дуговая сварка. Данная однородность позволяет предположить, что сварные соединения, полученные лазерной сваркой, будут более прочными как на этапе изготовления конструкции, так и в процессе ее эксплуатации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Халимов А.Г., Бакиев А.В., Зайнуллин Р.С. Работоспособность сварных соединений из стали 15X15M. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1991. 84 с.

2. Халимов А.А., Халимов А.Г., Жаринова Н.В., Файрушин А.М. Обеспечение технологической прочности сварных соединений из мартенситных хромистых сталей типа 15X5M // Нефтегазовое дело. 2012. Т. 10. № 3. С. 102–108.

3. Тукаев Р.Ф., Файрушин А.М., Сисанбаев А.В., Кучуков Т.М. Совершенствование технологии изготовления узла «труба – трубная решетка» кожухотрубчатого теплообменного аппарата из жаропрочной стали 15X5M применением лазерной сварки // Современное машиностроение. Наука и образование: матер. науч.-практ. конф. СПб.: СПбГПУ, 2013. С. 1179–1185.

4. Тукаев Р.Ф., Ибрагимов И.Г., Файрушин А.М., Сисанбаев А.В. Сравнительный анализ сварных швов в узле «труба – трубная решетка» кожухотрубчатого теплообменного аппарата из жаропрочной стали 15X5M полученных различными способами сварки // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2013. № 5. С. 363–375. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/TukaevRF/TukaevRF_1.pdf (дата обращения: 04.10.2020).

REFERENCES

1. Khalimov A.G., Bakiev A.V., Zainullin R.S. *Rabotosposobnost' svarnykh soedinenii iz stali 15Kh15M* [Performance of Steel Welded Joints 15CR5M]. Moscow, TsINTIkhimneftemash Publ., 1991. 84 p. [in Russian].

2. Khalimov A.A., Khalimov A.G., Zharinova N.V., Fairushin A.M. Obespechenie tekhnologicheskoi prochnosti svarnykh soedinenii iz martensitnykh khromistykh stalei tipa 15Kh5M [Ensuring Technological Strength of Welding Joints of Chromium Martensitic Steel 15CR5M].

Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering, 2012, Vol. 10, No. 3, pp. 102–108. [in Russian].

3. Tukaev R.F., Fairushin A.M., Sisanbaev A.V., Kuchukov T.M. Sovershenstvovanie tekhnologii izgotovleniya uzla «truba – trubnaya reshetka» kozhukhotrubchatogo teploobmennogo apparata iz zharoprochnoi stali 15Kh5M primeneniem lazernoi svarki [Improvement of the Manufacturing Technology of the «Tube-To-Tubesheet» Assembly of a Shell-and-Tube Heat Exchanger Made of 15Kh5M (15CR5MO) Heat-Resistant Steel Using Laser Welding]. *Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie»* [Materials of the Scientific-Practical Conference «Modern Mechanical Engineering. Science and Education»]. Saint Petersburg, SPbGPU Publ., 2013, pp. 1179–1185. [in Russian].

4. Tukaev R.F., Ibragimov I.G., Fairushin A.M., Sisanbaev A.V. Sravnitel'nyi analiz svarnykh shvov v uzle «truba – trubnaya reshetka» kozhukhotrubchatogo teploobmennogo apparata iz zharoprochnoi stali 15Kh5M poluchennykh razlichnymi sposobami svarki [Comparative Analysis of Different «Tube-To-Tubesheet» Weld Types on 15Kh5M (15CR5MO) Steel Heat Exchanger's Tubesheet]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» — Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2013, No. 5, pp. 363–375. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/TukaevRF/TukaevRF_1.pdf (accessed 04.10.2020). [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
ABOUT THE AUTHORS

Файрушин Айрат Миннуллович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Оборудование и технологии сварки и контроля», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Airat M. Fairushin, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Equipment and Technologies for Welding and Control Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: otsk@rusoil.net

Тукаев Рауль Фиделевич, инженер по бурению, ООО «Сервисная компания «ПетроАльянс», г. Нефтеюганск, Российская Федерация

Raul F. Tukaev, Directional Driller, PetroAlliance Services Company Ltd, Nefteyugansk, Russian Federation

e-mail: raul.tukaev@gmail.com

Аллабердин Ильнур Зуфарович, студент кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Ilnur Z. Allaberdin, Student of Transport and Storage of Oil and Gas Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: ailn7@mail.ru