

УДК 66.045.122

**ОЦЕНКА КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ  
СОЕДИНЕНИЙ ТРУБ С ТРУБНОЙ РЕШЕТКОЙ, ПОЛУЧЕННЫХ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ СВАРКИ**

**ASSESSMENT OF THE CORROSION RESISTANCE OF ROLLED  
AND WELDED TUBE TO TUBE SHEET JOINTS OBTAINED  
USING VARIOUS TECHNOLOGICAL PROCESSES**

**А.С. Токарев, Д.В. Каретников, Р.Г. Ризванов,  
С.Е. Черепашкин, Д.Ш. Муликов**

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

**Andrey S. Tokarev, Denis V. Karetnikov, Rif G. Rizvanov,  
Sergey E. Cherepashkin, Denis Sh Mulikov**

**Ufa State Petroleum Technological University,  
Ufa, Russian Federation**

**e-mail: andrewtok07@gmail.com**

**Аннотация.** При изготовлении теплообменной аппаратуры, нашедшей широкое применение в нефтегазовой промышленности, зачастую применяются методы дуговой сварки. Это может привести, в зависимости от материального исполнения аппарата, к значительному повышению расходов энерго- и трудовых ресурсов.

Целью исследований, приведенных в этой статье, было выяснить, удовлетворяют ли образцы, полученные с применением технологии сварки трением, являющейся альтернативой дуговым способам сварки, требованиям к коррозионной стойкости теплообменного оборудования из жаропрочных закаливаемых сталей при его эксплуатации, а также

сравнить их с образцами, полученными с применением дуговых способов сварки.

Для этого были проведены исследования макро- и микроструктур сварных соединений и распределений значений электродных потенциалов в различных зонах сварных соединений и основного металла. В качестве образцов для исследования использовались фрагменты соединений, имитирующих комбинированные соединения трубы с трубной решеткой, изготовленных из стали 15X5M. Образцы изготавливались с применением различных технологических процессов, отличающихся способом получения неразъемных соединений: с использованием ручной дуговой сварки металлическим покрытым электродом, дуговой сварки вольфрамовым электродом в среде инертного газа и сварки трением вращением, выступающей в качестве альтернативы дуговым способам сварки.

Сравнение макро- и микроструктур исследуемых соединений показало, что соединения, изготовленные с применением дуговых способов сварки, не обладают явно выраженной неоднородностью структуры металла шва после проведения термической обработки. Сварные соединения, изготовленные с применением сварки трением без проведения термической обработки, напротив, обладают структурной неоднородностью, однако, как показали предыдущие исследования, это не оказывает существенного влияния на механические свойства исследуемых образцов.

Сравнительный анализ распределения значений электродного потенциала по основному металлу и сварному соединению образцов, изготовленных с использованием различных способов сварки, показал, что с точки зрения электрохимической коррозии образцы, изготовленные сваркой трением, не уступают по коррозионной стойкости образцам, изготовленным с применением дуговых способов сварки.

**Abstract.** Arc welding methods are often used in the manufacture of heat exchange equipment, which is widely used in the oil and gas industry. This can

lead, depending on the material of construction of the apparatus, to a significant increase in the expenditure of energy and human resources.

The purpose of the studies presented in this paper was to find out whether the samples obtained using friction welding technology, which is an alternative to arc welding methods, meet the corrosion resistance requirements of heat-exchange equipment made of heat-resistant hardened steels during its operation, and to compare it with the samples obtained using arc welding methods.

For this, studies of macro- and microstructures of welded joints and distributions of electrode potentials in various zones of welded joints and base metal were conducted. Fragments of joints imitating rolled and welded tube to tube sheet joints of 15Cr5Mo steel were used as samples for study. Samples were made using various technological processes, differing in the method of producing permanent joints: using shielded manual metal arc welding, tungsten inert-gas arc welding and rotary friction welding, which serves as an alternative to arc welding methods.

Comparison of macro- and microstructures of the studied joints showed that joints made using arc welding methods do not have strongly marked heterogeneity of the weld metal structure after heat treatment. Welded joints made using friction welding without heat treatment, on the contrary, have structural heterogeneity, however, as shown by previous studies, this does not significantly affect the mechanical properties of the studied samples.

A comparative analysis of the distribution of electrode potential values over the base metal and the welded joint of samples made using various welding methods showed that, from the point of view of electrochemical corrosion, the samples made by friction welding are not inferior in corrosion resistance to the samples made using arc welding methods.

**Ключевые слова:** кожухотрубчатый теплообменный аппарат; дуговая сварка; сварка трением вращением; электрохимическая коррозия; сталь 15X5M; энергоэффективность

**Key words:** shell-and-tube heat exchanger; arc welding; rotary friction welding; electrochemical corrosion; steel 15Cr5Mo; energy efficiency

В нефтегазовой промышленности при работе с повышенными температурами и окислительными средами широко применяются машины и оборудование из жаропрочных сталей мартенситного класса [1–3]. При изготовления печного оборудования и теплообменных аппаратов применяются стали марки 15X5M и ее аналоги. Согласно данным заводоизготовителей оборудования, пятая часть всего произведенного оборудования относится к данному типу.

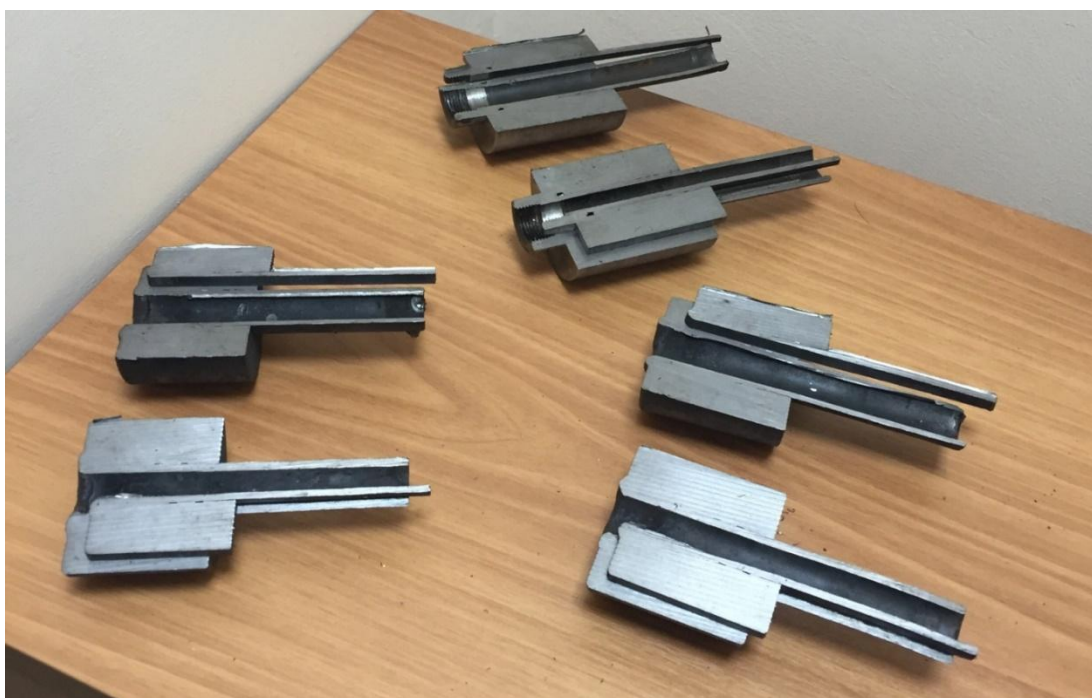
Для получения комбинированного соединения трубы с трубной решеткой применяется операция сварки. Особенностью стали 15X5M является ее плохая свариваемость, что вызывает необходимость проведения предварительного подогрева перед сваркой каждого соединения и сопутствующего подогрева во время сварки, при котором необходимо исключить охлаждение зоны соединения ниже 300 °С. Кроме того, сразу после сварки необходимо проводить высокий отпуск, который заключается в равномерном нагреве всей конструкции до температуры в диапазоне 750–760 °С, выдержке (зависит от толщины металла) при указанной температуре и медленном охлаждении [4–6]. При этом аппарат не рекомендуется транспортировать и нагружать до проведения термической обработки. Для уменьшения внутренних напряжений и деформаций в металле вышеназванные операции проводят со скоростями, не превышающими 70–100 °С/ч [7, 8]. Таким образом, применяющийся технологический процесс изготовления теплообменников из 15X5M является трудоемким и энергоемким, что негативно сказывается на себестоимости продукции [9].

На данный момент существует несколько альтернативных способов получения комбинированных соединений трубы с трубной решеткой, в

том числе из стали 15Х5М и ее аналогов [10–13]. Эти способы, как правило, основаны на снижении энергозатрат в соединении, за счет чего возможно исключить либо упростить процесс термической обработки в процессе изготовления аппаратов [14].

Одним из таких способов является сварка трением вращением. Данный способ сварки предполагает использование дополнительной привариваемой втулки, необходимость использования которой обусловлена технологической особенностью данного способа сварки [15].

Исследования проводились на образцах, имитирующих комбинированное соединение трубы с трубной решеткой, где вместо трубной решетки используется эквивалентная втулка (рисунок 1). Диаметр эквивалентной втулки рассчитывался согласно [16].



**Рисунок 1.** Разрезанные образцы, имитирующие комбинированное соединение трубы с трубной решеткой

Сварка образцов, изготовленных с применением сварки трением, проводилась на станке сварки трением типа ПСТ-20Т в ООО «КТИАМ», г. Челябинск. Режим сварки представлен в таблице 1. Термическая обработка не проводилась ни во время, ни после сварки.

**Таблица 1.** Режим сварки трением опытных образцов

Давление при нагреве, МПа	Давление при проковке, МПа	Время нагрева, с	Время проковки, с	Частота вращения, об/мин
2,0	3,5	6	2	1250

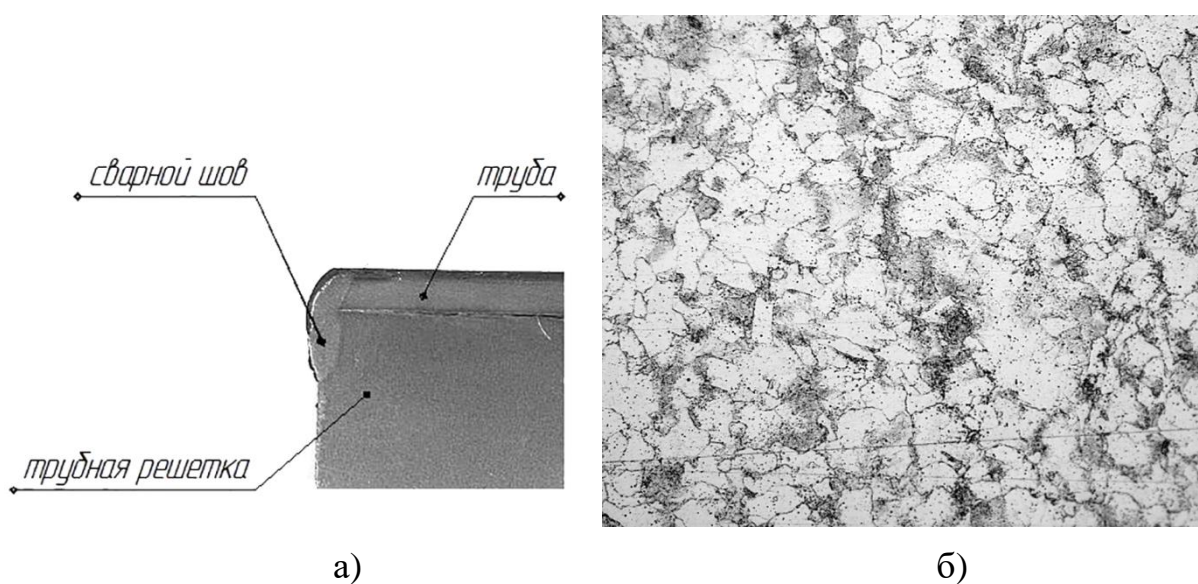
Сварка образцов с использованием ручной дуговой сварки металлическим покрытым электродом и дуговой сварки вольфрамовым электродом в среде аргона проводилась согласно требованиям ГОСТ Р 55601-2013 «Аппараты теплообменные и аппараты воздушного охлаждения. Крепление труб в трубных решетках. Общие технические требования». Перед началом и в процессе сварки выполнялся подогрев свариваемых образцов в интервале температур 300–350 °С. После окончания сварки была незамедлительно проведена термообработка, которая заключалась в объемном нагреве изделия в печи в интервале температур 750–760 °С в течение 2 ч и последующем медленном охлаждении.

С целью выяснить, удовлетворяют ли образцы, полученные с применением сварки трением, требованиям к коррозионной стойкости теплообменного оборудования из жаропрочных закаливающих сталей при его эксплуатации, а также для сравнения их с образцами, полученными с применением дуговых способов сварки, были проведены микроструктурные и коррозионные исследования образцов.

Образцы для исследования микроструктуры изготавливали по методике, приведенной в ГОСТ 5639-82 «Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна». Для получения изображений использовался оптический микроскоп. На рисунках 2–4 представлены фотографии макроструктуры сварного соединения и микроструктуры металла сварного шва образцов, полученных с использованием разных способов сварки.



На рисунке 2 показаны макро- и микроструктура образца, полученного с использованием сварки неплавящимся электродом в среде аргона, после проведения термической обработки. Из анализа фотографий видно, что микроструктура металла сварного шва представляет собой вытянутую в направлении кристаллизации структуру, состоящую из феррита и карбидов, неравномерно распределенных по границам и телу ферритных зерен. Зона термического влияния не наблюдается, что, вероятнее всего, является следствием проведения термической обработки образца.

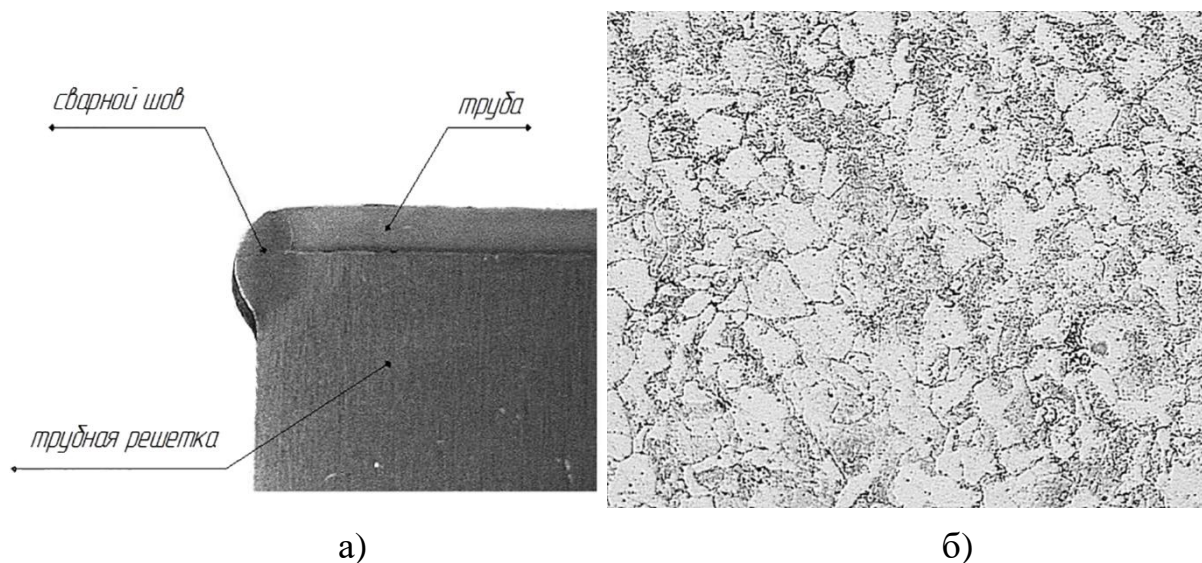


а) макроструктура сварного соединения;  
 б) микроструктура металла сварного шва (x 500)

**Рисунок 2.** Структура образца, полученного сваркой неплавящимся электродом в среде аргона

На рисунке 3 показаны макро- и микроструктура образца, полученного с использованием ручной дуговой сварки покрытыми электродами, также после проведения термической обработки. Микроструктура металла сварного шва представляет собой вытянутую в направлении кристаллизации структуру, состоящую из феррита и равномерно распределенных по телу ферритных зерен карбидов. Зона термического влияния также не наблюдается.

Основываясь на приведенном выше описании микроструктур, можно утверждать, что разница в микроструктуре образцов, полученных с использованием дуговых способов сварки, почти отсутствует. Данное явление может быть объяснено тем, что в обоих случаях образцы подверглись одинаковым по типу и режиму нагрева процессам термической обработки [17].



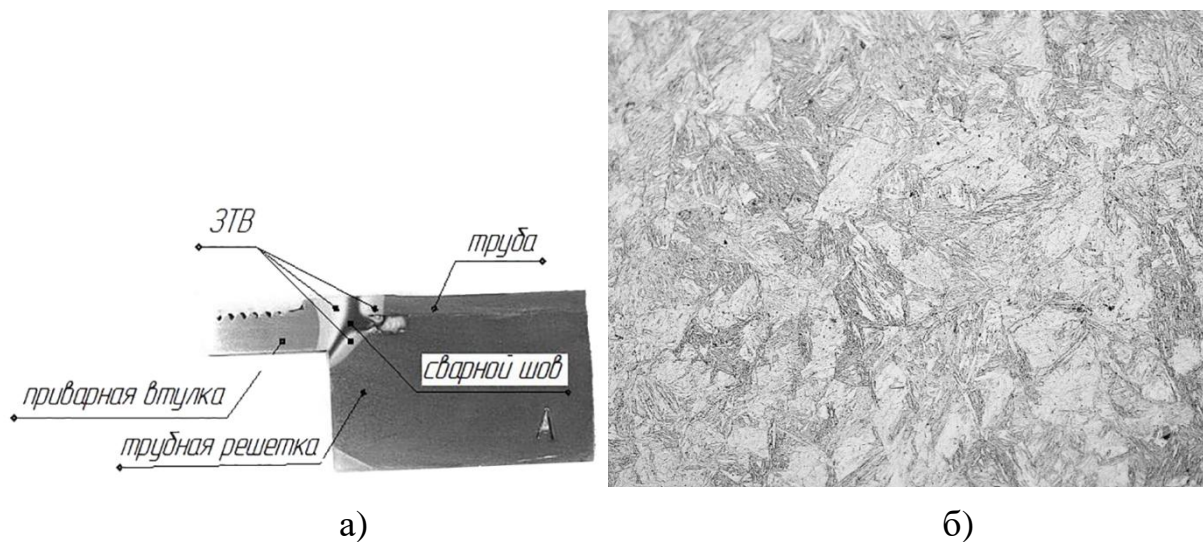
а) макроструктура сварного соединения;  
 б) микроструктура металла сварного шва (x 500)

**Рисунок 3.** Структура образца, полученного ручной дуговой сваркой покрытыми электродами

Образец, полученный с использованием сварки трением, отличается от двух других как по макро-, так и по микроструктуре (рисунок 4). Микроструктура металла сварного шва представляет собой крупноигльчатый мартенсит. Микроструктура металла зоны термического влияния со стороны эквивалентной втулки представляет собой сорбитообразную структуру, состоящую из феррита и расположенных равномерно по границам и телу ферритных зерен карбидов. Микроструктура металла зоны термического влияния со стороны трубы состоит из мелкоигльчатого мартенсита и глобулярных



карбидов, наличие которых говорит о перегреве металла трубы в процессе сварки.



а) макроструктура сварного соединения;  
 б) микроструктура металла сварного шва после травления  
 в спиртовом растворе 15 %-ой азотной кислоты (x 500)

#### Рисунок 4. Структура образца, полученного сваркой трением

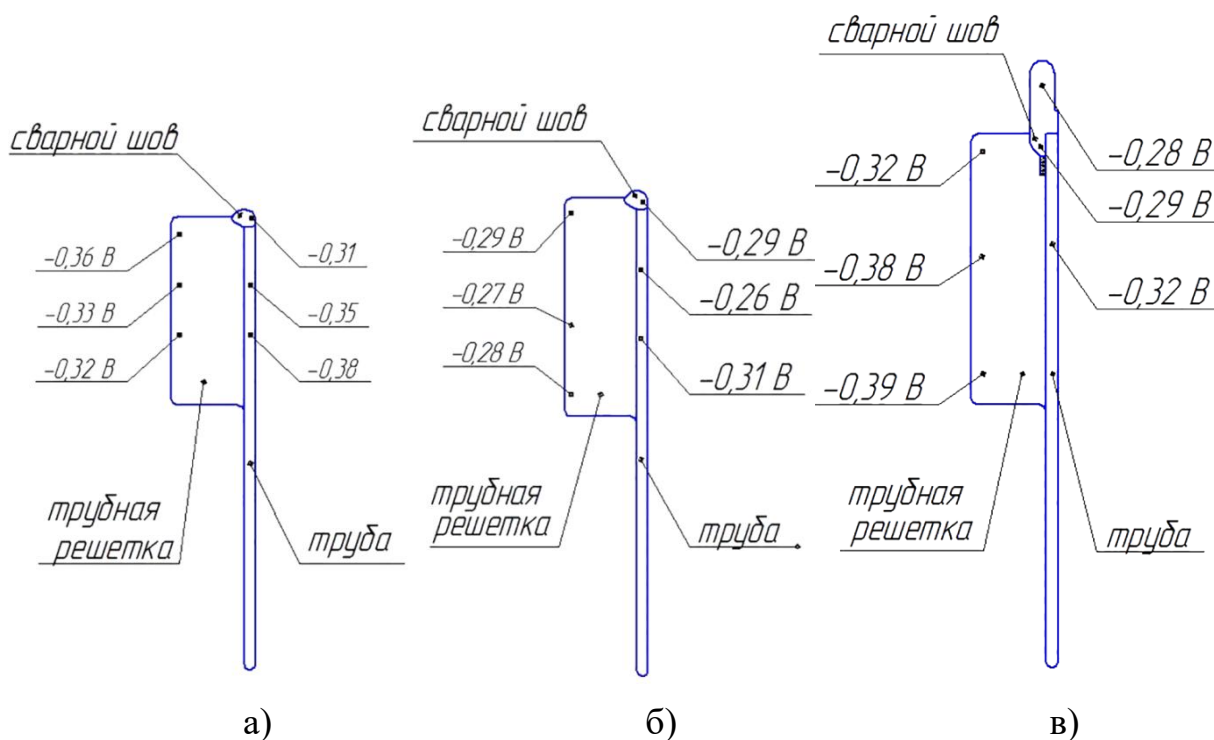
Приведенное выше описание микроструктуры образца, полученного сваркой трением, говорит о том, что данный образец имеет значительное различие в микроструктуре металла сварного шва и зоны термомеханического влияния. Хотя этот факт и не оказывает негативного влияния на механические свойства получаемых соединений [18, 19], это может привести к возникновению электрохимической неоднородности в зоне соединения. При контакте соединения с агрессивными электролитами могут появиться микрогальванические элементы, способствующие ускорению процессов коррозии. Как правило, разрушение сварных конструкций при этом происходит по сварному шву или зоне термического влияния.

По причине неравномерности коррозии сварного соединения массовый показатель не может характеризовать его коррозионную стойкость. В связи с этим для оценки коррозионной стойкости опытных образцов был выбран метод измерения электродных потенциалов.

Сварное соединение является сложной многоэлектродной системой, в которую входят сварной шов, зона термического влияния и основной металл. Между элементами этой системы возможны разные отношения электродных потенциалов. Измерение значений электродных потенциалов дает возможность судить о коррозионной стойкости конкретных зон сварного соединения, определить наиболее уязвимые участки. Определение электродных потенциалов используется для выбора наиболее оптимального с точки зрения коррозионной стойкости способа и режима сварки.

Наиболее оптимальным распределением электродных потенциалов является равенство электродных потенциалов шва и основного металла ( $\varphi_{\text{ш}} = \varphi_{\text{о.м.}}$ ), при котором будет проходить процесс общей равномерной коррозии. На практике добиться равенства электродных потенциалов шва и основного металла довольно сложно, поэтому стремятся добиться смещения электродного потенциала сварного шва в сторону бóльших значений ( $\varphi_{\text{ш}} > \varphi_{\text{о.м.}}$ ), при котором анодное растворение переходит на основной металл при уменьшении скорости коррозии шва [20].

Измерение распределения электродных потенциалов по различным зонам сварного соединения проводилось согласно общепринятой методике [20]. Измерения представляли собой регистрацию электродных потенциалов в различных точках сварного соединения и основного металла специальным электрохимическим щупом. Величина электродного потенциала фиксировалась вольтметром с относительной погрешностью измерений 5 %. Результаты измерений показаны на рисунке 5.



а) для образца, полученного с использованием ручной дуговой сварки металлическим покрытым электродом; б) для образца, полученного с использованием дуговой сварки вольфрамовым электродом в среде инертного газа; в) для образца, полученного с использованием сварки трением вращением

**Рисунок 5.** Схема эксперимента с отмеченными точками замеров и значениями их электродного потенциала (хлоридсеребряный электрод)

Из результатов измерения распределения электродных потенциалов следует, что сварной шов образца, полученный с использованием ручной дуговой сварки металлическим покрытым электродом, является более благородным относительно металла трубы и эквивалентной втулки.

Результаты измерения электродных потенциалов у образца, полученного с использованием дуговой сварки вольфрамовым электродом в среде инертного газа, показали, что электродный потенциал сварного шва почти равен потенциалам трубы и эквивалентной втулки.

У образца, полученного с использованием сварки трением вращением, потенциал сварного шва превышает потенциалы металла трубы и эквивалентной втулки.

Полученные данные позволяют утверждать, что во всех трех образцах распределение электродных потенциалов является благоприятным с точки зрения электрохимической коррозии.

### **Выводы**

1. Образец, имитирующий комбинированное соединение трубы с трубной решеткой, полученный с применением сварки трением, характеризуется неоднородностью микроструктуры металла шва и зоны термомеханического влияния, однако это не оказывает негативного влияния на механические свойства получаемых соединений.

2. Образец, полученный с использованием сварки трением с точки зрения электрохимической коррозии не уступает по своим свойствам образцам, полученным дуговыми способами сварки.

3. Пункты 1–2 позволяют рассматривать технологию изготовления комбинированных соединений труб с трубными решетками, включающую использование сварки трением вращением, для исследуемого типа сталей как альтернативную технологиям, подразумевающим использование дуговых способов сварки.

### **Список используемых источников**

1. Лашинский А.А., Толчинский А.Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры: справочник. М.: Альянс, 2008. 752 с.

2. Зайнуллин Р.С. Ресурсосберегающие технологии в нефтехимическом аппаратостроении. Уфа: ТРАНСТЭК, 2000. 348 с.

3. Zhidkov A.B., Vanslov A. V. Problems and Prospects of Development of Tube Furnaces for the Oil Refining Industry // Chem. Pet. Eng. Springer, 2001. Vol. 37, № 11. P. 603–605. DOI: 10.1023/A:1014897725178.

4. Халимов А.А., Жаринова Н.В. Оптимизация технологии высокотемпературной термической обработки сварных соединений из хромистых жаропрочных сталей // Технология машиностроения. 2009. № 10. С. 19–25.

5. Халимов А.А., Жаринова Н.В., Халимов А.Г., Файрушин А.М. Обеспечение технологической прочности сварных соединений из мартенситных хромистых сталей типа 15Х5М // Нефтегазовое дело. 2012. Т. 10, № 3. С. 102–108.

6. Халимов А.Г., Жаринова Н.В., Габбасов Д.Ф., Халимов А.А. Ресурсосберегающая технология ремонтной полуавтоматической сварки технологических трубопроводов из стали 15Х5М // Промышленная и технологическая безопасность: проблемы и перспективы. 2002. С. 177–179.

7. Халимов А.А., Халимов А.Г. Работоспособность нефтегазохимического оборудования из жаропрочных хромистых сталей // Мировое сообщество проблемы и пути решения: сб. ст. Уфа: УГНТУ, 2003. Т. 14. С. 85-97.

8. Ибрагимов И.Г., Ямилев М.З., Файрушин А.М. Совершенствование технологии выполнения сварного узла «труба – трубная решетка» кожухотрубчатых теплообменных аппаратов, изготовленных из мартенситных сталей // Нефтегазовое дело. 2009. Т. 7. № 1. С. 194-197.

9. Abson D.J., Tkach Y., Hadely I., Burdekin F.M. A Review of Post Weld Heat Treatment Code Exemptions // J. Weld. 2006. Vol. 85. P. 63–69.

10. Муликов Д.Ш., Яхин А.В., Каретников Д.В. Проблемы и пути совершенствования технологического процесса получения комбинированных соединений труб с трубными решетками кожухотрубчатых теплообменных аппаратов // Нефтегазовое дело. 2017. Т. 15. № 2. С. 134-140.

11. 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 15Х5М



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](http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/TukaevRF/TukaevRF_1.pdf). (дата обращения: 06.08.2019).

12. Vandewynckéle A., Vaamonde E., Fontán M., Herwig P., Mascioletti A. Laser Welding Head Tailored to tube-Sheet Joint Requirements for heat Exchangers Manufacturing // Phys. Procedia. Elsevier, 2013. Vol. 41. P. 144–152. DOI: 10.1016/j.phpro.2013.03.063.

13. Dard P., Roudier R., Sayegh G. New Realizations of Electron-Beam Welding Equipment to Join Tubes to Tubesheet // Adv. Weld. Process. 1978. Vol. 1. P. 291–301.

14. Тукаев Р.Ф., Файрушин А.М., Кучуков Т.М. Совершенствование технологии изготовления узла «труба – трубная решетка» кожухотрубчатого теплообменного аппарата из жаропрочной стали 15Х5М применением лазерной сварки // Современное машиностроение. Наука и образование. 2013. № 3. С. 1179-1185.

15. Токарев А.С., Каретников Д.В., Ризванов Р.Г. Определение оптимальных геометрических размеров элементов альтернативной конструкции комбинированных соединений труб с трубными решетками // Нефтегазовое дело. 2018. Т. 16. № 1. С. 92-101. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-1-92-101.

16. Ткаченко Г.П., Бриф В.М. Изготовление и ремонт кожухотрубчатой теплообменной аппаратуры. М.: Машиностроение, 1980. 160 с.

17. Chirkova A.G., Simarchuk A.S., Kinev S.A., Kuzeev I.R. Study of Welded Joints Properties of Coil Pipes of Furnace for Petroleum Hydrocarbons Pyrolysis // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2005. Vol. 71, № 9. P. 60–63.

18. Yakhin A.V., Karetnikov D.V., Rizvanov R.G., Abutalipova E.M., Gareev A.G., Tokarev A.S. Improving the Technology Used in Fabrication of

Tube Bundles of Heat Exchangers Produced from 12Cr18Ni10Ti Steel by Means of Friction Welding // Chemical and Petroleum Engineering. 2019. Vol. 54. Issue 11-12. P. 801-805. DOI: 10.1007/s10556-019-00553-5.

19. Rizvanov R.G., Mulikov D.S., Karetnikov D.V., Fairushin A.M., Tokarev A.S. Evaluation of the Possibility of Obtaining Tube-to-Tube Sheet Welded Joints of 15Cr5Mo Steel by Alternative Technological Process // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2018. Vol. 317. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/317/1/012077/pdf> (дата обращения: 12.08.2017). DOI:10.1088/1757-899X/317/1/012077.

20. Uhlig H.H., Revie R.W. Corrosion and Corrosion Control: an Introduction to Corrosion Science and Engineering // John Wiley Sons, Inc. 1985. P. 441.

## References

1. Lashchinskii A.A., Tolchinskii A.R. Osnovy konstruirovaniya i rascheta khimicheskoi apparatury: spravochnik [Fundamentals of the Design and Calculation of chemical Equipment: Handbook]. Moscow, AlianS, 2008, 752 p. [in Russian].

2. Zainullin R.S. Resursosberegayushchie tekhnologii v neftekhimicheskom apparatostroenii [Resource-Saving Technologies in Petrochemical Apparatus Engineering]. Ufa, TRANSTEK Publ., 2000, 348 p. [in Russian].

3. Zhidkov A.B., Vanslov A. V. Problems and Prospects of Development of Tube Furnaces for the Oil Refining Industry. Chemical and Petroleum Engineering, Springer, 2001, Vol. 37, No. 11, pp. 603–605. DOI: 10.1023/A:1014897725178.

4. Khalimov A.A., Zhapinova N.V. Optimizatsiya tekhnologii vysokotemperaturnoi tepmicheskoi obpabotki svapnykh soedinenii iz khpomistykh zhapoppochnykh stalei [Optimization of Technology of High-Temperature Heat Treatment of Welded Joints Made of Chrome-Plated Heat-Resistant Steels]. Tekhnologiya mashinostroeniya – Tekhnologiya Mashinostroeniya, 2009, No. 10, pp. 19-25. [in Russian].

5. Khalimov A.A., Zharinova N. V., Khalimov A.G., Fairushin A.M. Obespechenie tekhnologicheskoi prochnosti svarykh soedinenii iz martensitnykh khromistykh stalei tipa 15Kh5M [Ensuring the Technological Strength of Welded Joints from Martensitic Chromium Steels of Type 15Cr5Mo]. Neftegazovoe delo – Petroleum Engineering, 2012, Vol. 10, No. 3, pp. 102–108. [in Russian].

6. Khalimov A.G., Zharinova N.V., Gabbasov D.F., Khalimov A.A. Resursosberegayushchaya tekhnologiya remontnoi poluavtomaticheskoi svarki tekhnologicheskikh truboprovodov iz stali 15Kh5M [Resource-Saving Technology for Repair of Semi-Automatic Welding of Technological Pipelines Made of Steel 15Cr5Mo]. Promyshlennaya i tekhnologicheskaya bezopasnost': problemy i perspektivy [Industrial and Technological Safety: Problems and Prospects], 2002, pp. 177–179. [in Russian].

7. Khalimov A.A., Khalimov A.G. Rabotosposobnost' neftegazokhimicheskogo oborudovaniya iz zharoprochnykh khromistykh stalei [Efficiency of Petrochemical Equipment Made of Heat-Resistant Chromium Steels]. Sbornik statei «Mirovye soobshchestvo problemy i puti resheniya» [Collection of Articles «World Community Problems and Solutions»]. Ufa, UGNTU Publ., 2003, Vol. 14, pp. 85-97. [in Russian].

8. Ibragimov I.G., Yamilev M.Z., Fairushin A.M. Sovershenstvovanie tekhnologii vypolneniya svarnogo uzla «truba-trubnaya reshetka» kozhukhotrubchatykh teploobmennyykh apparatov, izgotovlennykh iz martensitnykh stalei [Technology Perfection of Welded Knot Performance the Pipe Trumpet Lattice of Shell and Tube Heat Exchanger Made from Martensitic Steels]. Neftegazovoe delo – Petroleum Engineering, 2009, Vol. 7, No. 1, pp. 194-197. [in Russian].

9. Abson D.J., Tkach Y., Hadely I., Burdekin F.M. A Review of Post Weld Heat Treatment Code Exemptions. J. Weld., 2006, Vol. 85, pp. 63–69.

10. Mulikov D.Sh., Yakhin A.V., Karetnikov D.V. Problemy i puti sovershenstvovaniya tekhnologicheskogo protsessa polucheniya kombinirovannykh soedinenii trub s trubnymi reshetkami kozhukhotrubchatykh teploobmennyykh apparatov [Problems and the Ways of Improvement of the Technological Process of Obtaining Combined Joints of Pipes with Pipe Grates Shell-and-Tube Heat Exchangers]. Neftegazovoe delo – Petroleum Engineering, 2017, Vol. 15, No. 2, pp. 134-140. [in Russian].

11. Tukaev R.F., Ibragimov I.G., Fairushin A.M., Sisanbaev A. V. Cravnitel'nyi analiz svarnykh shvov v uzle «truba – trubnaya reshetka» kozhukhotrubchatogo teploobmennogo apparata iz zharoprochnoi stali 15Kh5M poluchennykh razlichnymi sposobami svarki [Comparative Analysys of Different «Tube-to-Tubesheet» Weld Types on 15X5M (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](http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/TukaevRF/TukaevRF_1.pdf). (accessed 06.08.2019). [in Russian].

12. Vandewynckéle A., Vaamonde E., Fontán M., Herwig P., Mascioletti A. Laser Welding Head Tailored to Tube-Sheet Joint Requirements for Heat Exchangers Manufacturing. Physics Procedia, Elsevier, 2013, Vol. 41, pp. 144–152. DOI: 10.1016/j.phpro.2013.03.063.

13. Dard P., Roudier R., Sayegh G. New Realizations of Electron-Beam Welding Equipment to Join Tubes to Tubesheet. Advances in Welding Processes., 1978, Vol. 1, pp. 291–301.

14. Tukaev R.F., Fairushin A.M., Kuchukov T.M. Sovershenstvovanie tekhnologii izgotovleniya uzla «truba-trubnaya reshetka» kozhukhotrubchatogo teploobmennogo apparata iz zharoprochnoi stali 15Kh5M primeneniem lazernoi svarki [15X5M (15Cr5Mo) Shell and Tube Heat Exchanger Tube Sheet Production Modification with Laser Welding]. Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie – Modern Mechanical Engineering. Science and Education, 2013, No. 3, pp. 1179-1185. [in Russian].

15. Tokarev A.S., Karetnikov D.V., Rizvanov R.G. Opredelenie optimal'nykh geometricheskikh razmerov elementov al'ternativnoi konstruksii kombinirovannykh soedinenii trub s trubnymi reshetkami [Optimal Geometric Dimensions Determination of the Elements of the Alternative Construction of Combined Pipe Joints with Tube Sheets]. Neftegazovoe delo – Petroleum Engineering, 2018, Vol. 16, No. 1, pp. 92-101. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-1-92-101 [in Russian].

16. Tkachenko G.P., Brif V.M. Izgotovlenie i remont kozhukhotrubchatoi teploobmennoi apparatury [Manufacture and Repair of Shell-and-Tube Heat-Exchange Equipment]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980, 160 p. [in Russian].

17. Chirkova A.G., Simarchuk A.S., Kinev S.A., Kuzeev I.R. Study of Welded Joints Properties of Coil Pipes of Furnace for Petroleum Hydrocarbons Pyrolysis. Zavodskaya laboratoya. Diagnostika materialov – Factory Laboratory. Material Diagnostics, 2005, Vol. 71, No. 9, pp. 60–63.

18. Yakhin A.V., Karetnikov D.V., Rizvanov R.G., Abutalipova E.M., Gareev A.G., Tokarev A.S. Improving the Technology Used in Fabrication of Tube Bundles of Heat Exchangers Produced from 12Cr18Ni10Ti Steel by Means of Friction Welding. Chemical and Petroleum Engineering, 2019, Vol. 54, Issue 11-12, pp. 801-805. DOI: 10.1007/s10556-019-00553-5.

19. Rizvanov R.G., Mulikov D.S., Karetnikov D.V., Fairushin A.M., Tokarev A.S. Evaluation of the Possibility of Obtaining Tube-to-Tube Sheet Welded Joints of 15Cr5Mo Steel by Alternative Technological Process. IOP Conference Series «Materials Science and Engineering», 2018, Vol. 317.

20. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/317/1/012077/pdf> (accessed 12.08.2017). DOI:10.1088/1757-899X/317/1/012077.

21. Uhlig H.H., Revie R.W. Corrosion and Corrosion Control: an Introduction to Corrosion Science and Engineering. John Wiley & Sons, Inc., 1985, 441 p.



## Сведения об авторах

### about the authors

Токарев Андрей Сергеевич, ассистент кафедры «Оборудование и технологии сварки и контроля», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Andrey S. Tokarev, Assistant of Equipment and Technologies for Welding and Control Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: andrewtok07@gmail.com

Каретников Денис Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Оборудование и технологии сварки и контроля», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Denis V. Karetnikov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Equipment and Technologies for Welding and Control Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: karetnikov2811@gmail.com

Ризванов Риф Гарифович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология нефтяного аппаратостроения», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Rif G. Rizvanov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Oil Processing Equipment Technology Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: rifriz@mail.ru

Черепашкин Сергей Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Sergey E. Cherepashkin, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Oil Processing Equipment Technology Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: tna\_ugntu@mail.ru

Муликов Денис Шамильевич, аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Denis Sh. Mulikov, Post-graduate Student of the Chair «Process Machinery and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: mulikov.denis@gmail.com