

УДК 621.789

Р.Г. Ризванов, д-р техн. наук, проф., Д.В. Каратников, канд. техн. наук,  
А.М. Файрушин, канд. техн. наук, Д.Ш. Муликов, аспирант  
Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия  
Tel.: 89177556131; E-mail: [tma\\_ugntu@mail.ru](mailto:tma_ugntu@mail.ru)

## О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СВАРКИ ТРЕНИЕМ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРНЫХ ТРУБНЫХ ПУЧКОВ ИЗ СТАЛИ 15Х5М

В статье представлены результаты механических испытаний и металлографических исследований металла сварных соединений трубных заготовок из хромомолибденовой мартенситной стали 15Х5М, полученных сваркой трением при вращении. Приведена конструкция узла и режим сварки. На основании проведенных исследований и анализа результатов сделан вывод о хорошей свариваемости стали 15Х5М сваркой трением и о возможности применения данного способа сварки для изготовления узлов «труба-трубная решетка» трубных пучков кожухотрубчатых теплообменных аппаратов из стали 15Х5М при соответствующей модернизации сварочного оборудования.

**Ключевые слова:** мартенситная сталь, сварка трением, сварное соединение, свариваемость.

### 1. Введение

Широкий спектр теплообменного оборудования используемого в нефтегазовой отрасли для организации процессов высокотемпературной переработки окислительных серосодержащих сред изготавливается из низко и среднелегированных жаропрочных хромистых и хромомолибденовых сталей мартенситного класса. Это объясняется их способностью длительное время отвечать эксплуатационным характеристикам, предъявляемым к оборудованию и его элементам, под постоянным воздействием высоких температур, агрессивных сред и механических напряжений, при этом имея низкую себестоимость по сравнению с высоколегированными аустенитными сталями.

Одним из представителей сталей данного класса является мартенситная сталь 15Х5М, которая применяется для изготовления корпусов и внутренних элементов сварного технологического оборудования, в частности трубных пучков и корпусов кожухотрубчатых теплообменных аппаратов в различном конструктивном исполнении.

С позиции обеспечения работоспособности и надёжности сварного оборудования из жаропрочных хромистых сталей значительное количество технологических проблем вызвано склонностью сталей данного класса к закалке, по причине сравнительно невысокой скорости распада хромистого аустенита и фазовых превращений мартенситного характера, в частности по зоне сварного шва и зоне термического влияния. Этот факт объясняет необходимость обязательного применения термических операций, для возможности получения работоспособных сварных соединений.

В общем случае дуговая сварка мартенситной хромомолибденовой стали в обязательном порядке проводится с предварительным и сопутствующим подогревом при температуре 300...350 °С, при этом необходимо учитывать, что в связи с низкой теплопроводностью и высоким коэффициентом линейного расширения для предотвращения развития значительных внутренних напряжений нагрев до необходимых температур предварительного и сопутствующего подогрева и

охлаждение ведут со скоростями, не превышающими 100 °С/час, что так же существенно удлиняет и усложняет технологический процесс производства и снижает производительность работ [1-4].

В качестве термообработки проводится отпуск при температурах 750...760 °С с выдержкой при данной температуре в течении 2 часов. При этом сваренную конструкцию до проведения термообработки не рекомендуется подвергать каким-либо механическим нагрузкам, кантовать и транспортировать. Так же регламентируется продолжительность хранения до термообработки, в частности для сталей 15Х5, 15Х5М термообработка должна проводится незамедлительно после окончания процесса сварки [4]. Очевидно, что трудоёмкость вышенназванных мер по обеспечению технологической и эксплуатационной прочности сварных соединений многократно возрастает при изготовлении крупногабаритных конструкций, каковыми в основном являются представители нефтеперерабатывающего и нефтехимического оборудования.

## 2. Основное содержание и результаты работы

Одним из альтернативных вариантов снижения трудоёмкости изготовления теплообменной и другой технологической аппаратуры из закаливающихся сталей является применение способов сварки с высокой концентрацией энергии в пятне нагрева (лазерная сварка [3]) или способов сварки трением. Применение последних потребует модернизации конструкции основных узлов теплообменной аппаратуры, хотя при этом позволит существенно снизить затраты на производство и повысить скорость изготовления. Пример возможной конструкции узла «труба-трубная решетка», изготавливаемого сваркой трением представлен на рис. 1. После развалицовки или фиксации положения трубы 1 относительно трубной решетки 2 под углом 3 осуществляют подготовку кромок. Далее специальной оснасткой приводят во вращение шайбу 4 с усилием прижатия и последующим проковочным усилием после прекращения вращения. Внутренний диаметр шайбы 4 равен проходному диаметру  $d_f$  трубы 1 [6]. Преимущество данного способа заключается в том, что он может быть использован как при изготовлении, так и при ремонте трубных пучков кожухотрубчатых теплообменных аппаратов, в частности из стали 15Х5М. Однако на сегодняшний день отсутствуют данные о технологической прочности и механических свойствах сварных соединений из стали 15Х5М, полученных сваркой трением.

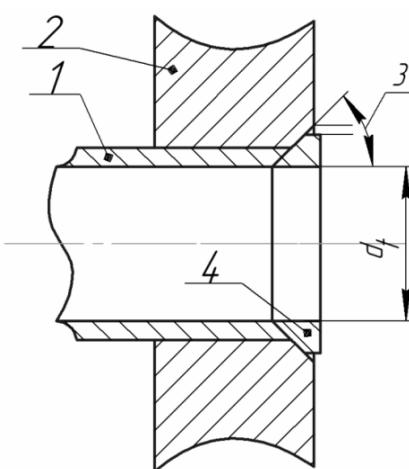


Рис. 1. Схема узла «труба-трубная решетка», получаемого сваркой трением [6]

Для исследования свойств указанных сварных соединений, из горячекатаного прутка из стали 15Х5М были изготовлены натурные образцы - трубные заготовки с наружным диаметром 35 мм и внутренним диаметром 23 мм. Сварка трением с применением вращения проводилась на машине для сварки трением ПСТ-20Т, производства ОАО «КТИАМ» г. Челябинск. Режимы сварки представлены в табл. 1. Фото полученного сварного соединения образцов представлена на рисунке 2,а. На рис. 2,б представлено фото сечения сварного шва полученного по существующей технологии.

Таблица 1. Режим сварки трением опытных образцов

Частота вращения, об/мин	Осьное усилие, Н		Продолжительность, с	
	Нагрев	Проковка	Нагрева	Проковки
1250	50	80	7	2



а) сварка трением (толщина стенки 6 мм) б) дуговая сварка (толщина стенки 8 мм)

Рис. 2. Фото сварного соединения трубной детали из стали 15Х5М

Оценка характеристик статической прочности проводилась в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-84 и ГОСТ 6996-66 при комнатной температуре на цилиндрических образцах (тип IV ГОСТ 1497-84, тип XXV ГОСТ 6996-66) на разрывной машине Instron 5982. Значения временного сопротивления разрыву  $\sigma_v$ , предела текучести  $\sigma_t$  и относительного удлинения  $\delta_5$  и сужения  $\psi$  для образцов из основного металла, металла сварного соединения и сварного шва, полученные как среднее значение по результатам испытаний трёх образцов, представлены в таблице 2.

Таблица 2. Механические характеристики металла сварного соединения

Механические свойства	Основной металл	Зона термо-механического влияния	Зона соединения
$\sigma_t$ , МПа	268	393	1223
$\sigma_v$ , МПа	522	558	1594
$\delta_5$ , %	33	24	7,6
$\psi$ , %	81	72	19

Из табл. 2 видно, что характеристики статической прочности полученного сварного соединения находятся на уровне основного металла и даже незначительно превышают его. Пластические свойства металла зоны термомеханического влияния на основании значений относительного удлинения ( $\delta_5=24\%$ ) и сужения ( $\psi=72\%$ ) можно считать высокими, в особенности с учётом того, что сваренные детали не подвергались сопутствующему подогреву и термической обработке после сварки, которые были бы необходимы для получения заданного уровня пластических свойств при сварке плавлением. В зоне соединения наблюдается значительное повышение предела прочности и текучести с характерным при этом снижением значений относительного сужения и удлинения.

На полученном сварном соединении представленном на рис. 2,а отчётливо видно отсутствие грубых дефектов типа трещин, несплавлений, при этом зона соединения и зона термомеханического влияния (ТМВ) ниже по сравнению с дуговой сваркой в несколько раз.

Распределение микротвёрдости по сечению сварного соединения, в основном металле трубы, зоне термомеханического влияния (ТМВ) и зоне соединения показано на рис. 3.

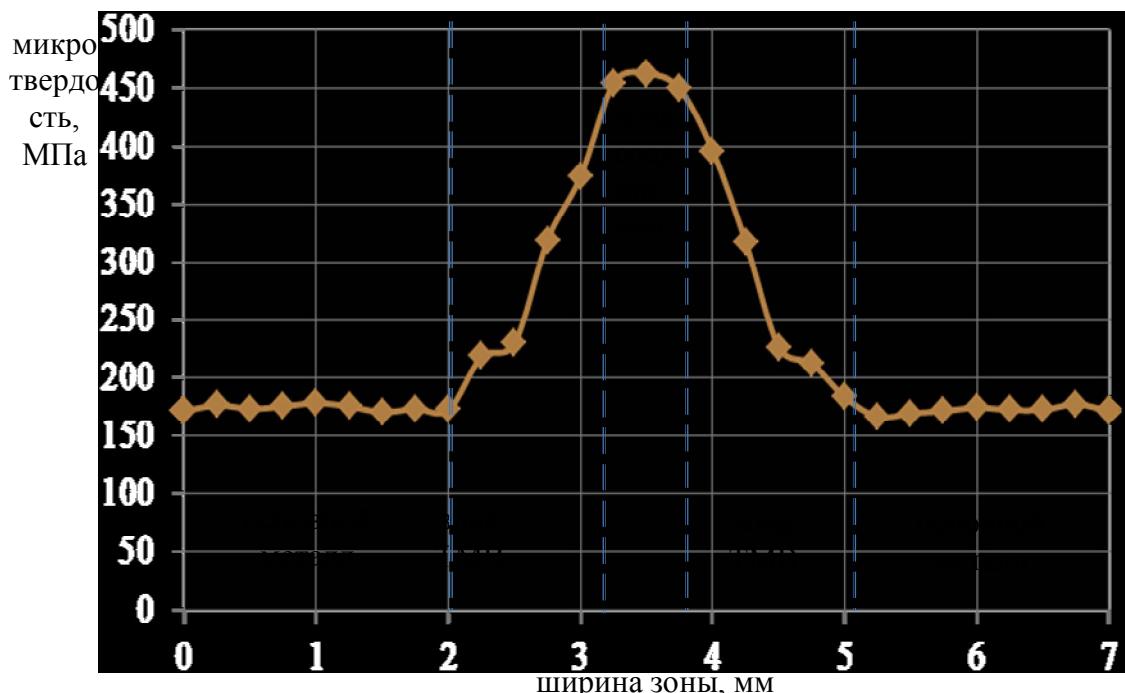


Рис.3. Распределение микротвёрдости по сечению сварного соединения трубной детали из стали 15Х5М, полученной сваркой трением

Из рисунка видно, что распределение микротвёрдости по сечению сварного соединения наблюдается с максимумом в центре шва, что является характерным для сварных соединений из стали 15Х5М, полученных сваркой плавлением. При дуговой сварке с предварительным подогревом до 300...350°C образуется сравнительно

широкая зоны подкалки со структурой крупноигольчатого мартенсита (как видно из рис. 2,б) с микротвердостью до  $440 \text{ H}\mu$ . При этом ширина окколошовных зон подкалки (матовые окколошовные участки на макрошлифах), имеющих структурно неравновесное строение, достигает 7 мм [4].

Результаты замера микротвердости и фотографии макроструктуры показывают, что ширина полученного сварного соединения составляет ориентировочно 2,8...3 мм для детали толщиной 6 мм, что значительно меньше по сравнению с дуговыми способами сварки. Соответственно это приводит к снижению объема металла имеющего высокий уровень напряжений и снижает вероятность образования холодных трещин.

По ширине сварного соединения отсутствуют скачки микротвёрдости характерные для зоны термического влияния сварных соединений, полученных дуговой сваркой, что будет являться фактором, положительно сказывающимся на ресурсе сварного соединения вследствие меньшей неоднородности механических свойств по сечению сварного соединения.

Повышенные по сравнению с основным металлом значения микротвёрдости, по мнению авторов, можно объяснить образованием ультрамелкозернистой структуры в результате деформационного упрочнения в течение термо-деформационного цикла сварки трением (аналогичное мнение высказывается в работе [7]). Таким образом, можно сделать вывод о том, что повышенные значения микротвёрдости в зоне сварного соединения наблюдаются не вследствие образования закалочных структур, а в результате более высокой «плотности» структуры металла сварного соединения.

На рис. 4 показаны фотографии микроструктуры характерных зон сварного соединения, полученные на растровом микроскопе с 1000 кратным увеличением.

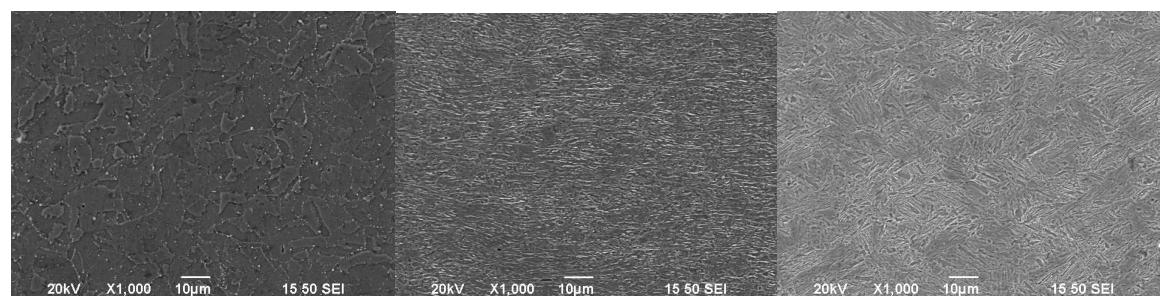


Рис.4. Микроструктура характерных зон сварного соединения (x1000)

Визуальный анализ снимков показывает, что в результате термо-деформационного цикла сварки структура характерных зон сварного соединения изменяется по сравнению с основным металлом и повышается степень её однородности. При этом микроструктура металла сварного соединения имеет более «разориентированный» характер по сравнению с зоной термомеханического влияния и основным металлом, что объясняется более высоким уровнем напряжений и деформаций, возникающих в контакте деталей в процессе сварки и проковки. Указанный выше характер микроструктуры зоны соединения частично объясняет повышение уровня механических и пластических свойств металла сварного соединения при повышенных значениях микротвердости.

### **Заключение**

1. Сталь 15Х5М обладает хорошей свариваемостью сваркой трением вращением, которая позволяет получить сварные соединения с механическими и пластическими свойствами в зоне термомеханического влияния на уровне основного металла без применения термических операций.

2. Применение сварки трением для изготовления трубных пучков теплообменных аппаратов из стали 15Х5М является экономически обоснованным, несмотря на необходимость существенной модернизации разработки специализированного сварочного оборудования.

### **Список литературы:**

1. Щекин В.А. Технологические основы сварки плавлением. - М: Изд-во Феникс, 2009. – 345 с. ISBN 978-5-222-14961-4.

2. Ямилев М.З., Ибрагимов И.Г., Файрушин А.М., Салмин А.Н. Совершенствование технологии выполнения сварного узла трубы – трубная решетка кожухотрубчатых теплообменных аппаратов, изготовленных из мартенситных сталей // Научно-технический журнал «Нефтегазовое дело» - 2009. – Том 7. - №1, - С. 194 - 197. ISSN 2073-0128.

3. 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 // Нефтегазовое дело: электрон.науч. журн. 2013. - №5. - С. 363-375. URL: [http://www.ogbus.ru/authors/TukaevRF/TukaevRF\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/TukaevRF/TukaevRF_1.pdf). ISSN 1813-503X.

4. Халимов А.А., Жаринова Н.В., Халимов А.Г., Файрушин А.М. Обеспечение технологической прочности сварных соединений из мартенситных хромистых сталей типа 15Х5М // Научно-технический журнал «Нефтегазовое дело» - 2012. – Том 10. - №3, - С. 102 – 108. ISSN 2073-0128.

5. Сварка. Резка. Контроль: Справочник. В 2-х томах / Под общ.ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышова. - М.: Машиностроение, 2004. Т. 2. - 480 с. ISBN 5-217-03262-6.

6. Способ соединения узла "труба-трубная решетка" сваркой трением Каратников Д.В., Ризванов Р.Г., Файрушин А.М., Муликов Д.Ш., Баландина А.Г. Патент на изобретение RU 2012149757 A, 27.05.2014.

7. Закирова А.А., Нагимов М.И., Хуснуллин А.М., Кашаев Р.М. Структура, свойства и горячая деформация сварного соединения стали 08Х18Н10Т, полученного линейной сваркой трением (ЛСТ) // Перспективные материалы. - 2011. - № 12. - С. 155-160. ISSN 1028-978X.

Надійшла до редколегії 17.12.2014.

**R.G. Rizvanov, D.V. Karetnikov, A.M. Fairushin, D.Sh.Mulikov**

**VALUATION OF POSSIBILITY OF USING FRICTION WELDING FOR PRODUCTION HEAT EXCHANGERS OF 15CR5MO STEEL**

*Results of mechanical testing and metallographic analysis of tube's welding joints of 15Cr5Mo steel, jointed with friction welding, are shown in the issue. Configuration of assembly and welding conditions are shown in the issue. On base of received results conclusion about good weldability of 15Cr5Mo steel by friction welding is done. Also friction welding can be used for producing heat exchanger's tube plate of 15Cr5Mo if welding equipment will be modified for it.*

**Key words:***martensitic steel, friction welding, welding joint, weldability*