

УДК 621.7.044

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА ЗМЕЕВИКОВ ТРУБЧАТЫХ ПЕЧЕЙ ИЗ СТАЛИ МАРКИ 15X5М С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ

Хаддад Джассем Али, Ризванов Р.Г.<sup>1</sup>, Файрушин А.М., Колесников  
Уфимский государственный нефтяной технический университет, г.Уфа  
<sup>1</sup>e-mail: rizvanov@rusoil.net

**Аннотация.** Работа посвящена совершенствованию технологии ремонта змеевиков трубчатых печей из стали 15X5М заменой предварительного и сопутствующего подогрева вибрационной обработкой, выполняемой в процессе сварки. С целью оценки влияния сопутствующей вибрационной обработки на микроструктуру, механические свойства и технологическую прочность сварных соединений из стали 15X5М, были выполнены экспериментальные сварные швы на трубных образцах при различных режимах виброобработки. Трубные образцы были вырезаны из змеевика трубчатой печи, эксплуатировавшейся более 10 лет. Результаты исследований показали, что виброобработка, выполняемая в процессе сварки трубных образцов, измельчает микроструктуру и повышает ударную вязкость металла шва, снижает твердость в зоне термического влияния, обеспечивает необходимую технологическую прочность сварных соединений.

**Ключевые слова:** термообработка, мартенситная сталь, сварные конструкции, холодные трещины, вибрационная обработка, механические свойства, микроструктура, сварной шов

В современных условиях нефтепереработки, связанных с растущими требованиями к качеству выпускаемой продукции и обеспечению безопасности процессов, а также с учетом многообразия технологических процессов и их интенсификации, усложняются условия работы оборудования и расширяется номенклатура применяемых материалов. Значительная часть оборудования, в особенности используемого для осуществления высокотемпературных процессов переработки в сероводородных и окислительных серосодержащих средах, изготавливается из жаропрочных хромомолибденовых сталей типа 15X5М. Наиболее характерным объектом широкого применения хромомолибденовой стали марки 15X5М служат змеевики трубчатых печей, которые наиболее теплонапряжены и относятся к ответственным конструкциям, работающим в очень жестких условиях. Они подвержены коррозионно-эрозионному износу, как по внутренней, так и по наружной поверхности труб. В производственной практике нередко встречаются случаи отклонений от технологического режима эксплуатации нагревательных трубчатых печей, сопряженных со значительным перегревом труб, что неизбежно ведет к изменению структурного состояния и соответственно механических свойств металла змеевиков. Это зачастую приводит к преждевременному разрушению змеевиков и аварийным остановкам трубчатых печей.

Стали типа 15X5М выгодно отличаются от высоколегированных аустенитных сталей более низкой стоимостью, лучшей деформируемостью в горячем

состоянии и обрабатываемостью резанием, высокой теплопроводностью и меньшим температурным коэффициентом линейного расширения, большей релаксационной способностью и возможностью изменения механических свойств в широких пределах посредством термической обработки [1].

Однако, повышенная склонность мартенситных сталей к хрупкому разрушению в состоянии закалки усложняет технологию их сварки. При содержании углерода более 0,10 % мартенситные стали склонны к образованию холодных трещин при сварке из-за высокой степени тетрагональности кристаллической решетки мартенсита. В сварных соединениях мартенситных сталей трещины могут наблюдаться в процессе непрерывного охлаждения при температурах ниже температуры начала мартенситного превращения  $M_n$  (для высокохромистых сталей не более 360 °С), а также в процессе выдержки при нормальной температуре (замедленное разрушение). С увеличением содержания углерода температура начала мартенситного превращения  $M_n$  и температура окончания мартенситного превращения  $M_k$  (обычно 240 °С) еще более понижаются, что приводит к возрастанию твердости мартенсита и его хрупкости. Учитывая это, а также необходимость обеспечения высокой пластичности и ударной вязкости сварных соединений, содержание углерода в хромистых мартенситных сталях ограничивают до 0,20 %. Для предотвращения образования холодных трещин при сварке этих сталей применяют предварительный и сопутствующий подогрев до 200...450 °С. Температура подогрева тем выше, чем выше склонность стали к закалке.

В то же время температура подогрева не должна быть чрезмерно высокой, так как это может привести к отпускной хрупкости вследствие снижения скорости охлаждения металла в околошовной зоне в интервале температур карбидообразования. Кроме того, высокий подогрев, как и сварка с высокой погонной энергией, обеспечивает длительный перегрев околошовного металла, который вызывает рост зерна, скопление примесей на границах зерен и, как следствие, снижение пластичности и ударной вязкости сварных соединений.

С позиции технологической и эксплуатационной прочности наиболее слабым звеном сварных конструкций из мартенситных сталей является образование зон повышенной твердости различного происхождения.

Особенностью ремонтно-сварочных работ, выполняемых на оборудовании, изготовленном из стали 15X5M, является необходимость предварительного и сопутствующего подогрева сварных соединений с целью снижения вероятности образования холодных трещин и повышения технологической прочности сварного соединения. Однако, эта операция значительно снижает производительность работ, увеличивает энергетические и трудовые затраты и в монтажных условиях не всегда возможна.

В условиях производства очень важно быстро и качественно провести ремонтно-восстановительные работы с соблюдением всех действующих норм,

которые нередко предполагают замену секций змеевиков, а это выливается в большие материальные затраты.

Таким образом, необходима разработка научно обоснованных ресурсосберегающих технологий ремонта оборудования из стали 15Х5М, направленных на увеличение технологической прочности сварных соединений, исключение трудоемкой операции подогрева, повышение производительности работ.

В последние годы появилось достаточно большое количество работ, направленных на решение задач данного типа. Для снижения склонности к образованию холодных трещин предлагается применять энергию ультразвуковых и вибрационных колебаний, сопутствующее охлаждение, энергию взрыва, облучение лазером и другие способы [1, 2].

Учитывая специфику отрасли, на наш взгляд наиболее применим способ вибрационной обработки сварных соединений в процессе сварки, который позволит снизить уровень остаточных напряжений, повысить механические свойства сварного шва и производительность работ за счёт исключения операции подогрева [3].

Для разработки технологии ремонта с применением сопутствующей вибрационной обработки деталей в процессе сварки были проведены исследования ее влияния на свойства металла сварных соединений.

Исследования проводили на натуральных образцах (трубных катушках) из жаропрочной мартенситной стали марки 15Х5М, используя различные виды обработки, указанные в табл. 1.

Таблица 1. Типы экспериментальных образцов

Тип образца	Вид сопутствующей обработки при сварке образцов
1	Предварительный подогрев до 300...350 °С
2	Вибрационная обработка при частоте 90-100 Гц, амплитуде до 0,2 мм
3	Вибрационная обработка при частоте 130-140 Гц, амплитуде до 0,2 мм
4	Вибрационная обработка при частоте 160-165 Гц, амплитуде до 0,2 мм

Электродуговую сварку производили на следующих режимах: постоянный ток обратной полярности, сила сварочного тока от 95 до 115 А, напряжение 25 В. Источник питания – выпрямитель ВДУ-506. Применяемые электроды – ЦЛ-17 диаметром 3-4 мм. Вибрационная обработка производилась с применением пневматического виброустройства ВШ-10, создающего колебания различной частоты в зависимости от давления подаваемого компрессором воздуха. Замер параметров вибрационных колебаний производили виброанализатором марки CSI 1900.

Испытания проводили на трубных катушках диаметром 219 мм, толщиной 10 мм, вырезанных из змеевика трубчатой печи, находившейся в эксплуатации более 10 лет. На катушках были выполнены выборки предполагаемых окружных трещин в соответствии с существующей технологией ремонта (рис. 1).

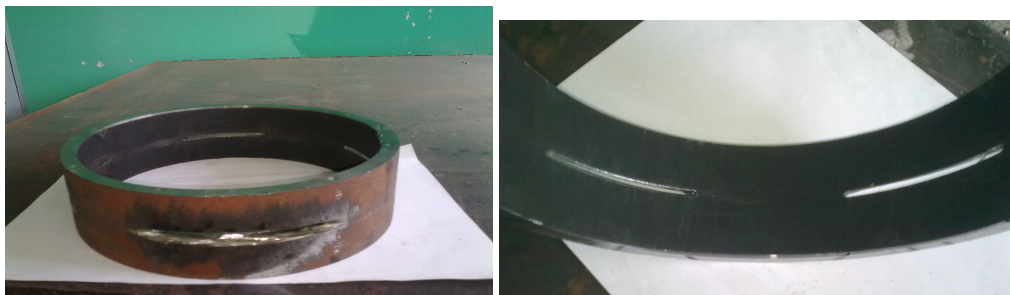


Рис. 1. Фотографии образцов с окружными выборками металла

Далее проводилась заварка трещин с применением различных видов сопутствующей обработки, указанных в табл. 1. После сварки были проведены визуальный контроль и цветная дефектоскопия сварных швов, результаты которых показали отсутствие трещин в сварных соединениях. Из трубных катушек были вырезаны образцы для испытаний на ударный изгиб (по 3 штуки для каждого шва), замера твердости и металлографического исследования металла сварного соединения.

При испытаниях на ударный изгиб определяли ударную вязкость металла шва. Температура испытаний составляла 20 °С, ширина образцов – 8 мм, высота рабочего сечения – 6 мм. Результаты испытаний на ударный изгиб образцов, полученных при различных видах сопутствующей обработки в процессе сварки, показаны на рис. 2.

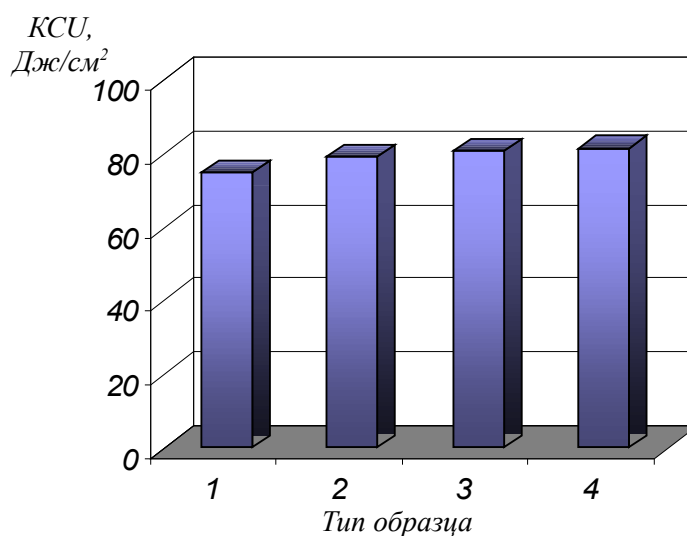


Рис. 2. Диаграмма средней величины ударной вязкости металла сварных швов

Как видно из результатов испытаний, ударная вязкость металла образцов, сваренных с применением вибрационной обработки, имеет значения выше, чем при сварке с предварительным подогревом. Ударная вязкость металла сварного шва, полученного при вибрационной обработке, увеличилась в среднем на 8 %.

Определение твердости металла сварного соединения проводили с помощью портативного ультразвукового твердомера МЕТ-У. Результаты измерений показали, что с увеличением частоты колебаний твердость металла сварного шва незначительно повысилась, а в зоне термического влияния уменьшилась на 15-18 %, что косвенно показывает на снижение уровня остаточных напряжений в сварном соединении.

С целью изучения изменения структуры металла в сварном шве и околошовной зоне в зависимости от вида и режима обработки в процессе сварки было проведено металлографическое исследование образцов.

Исследуемые образцы после полирования подвергли травлению в насыщенном спиртовом растворе азотной кислоты. Для исследования микроструктуры использовался оптический микроскоп МЕТАМ РВ-22 с увеличением  $\times 300$ . Полученные на микроскопе фотографии обрабатывались на компьютере с помощью программы SIAMS 600.

Фотографии микроструктуры металла сварного шва в поперечном сечении для различных типов образцов представлены на рис. 3.

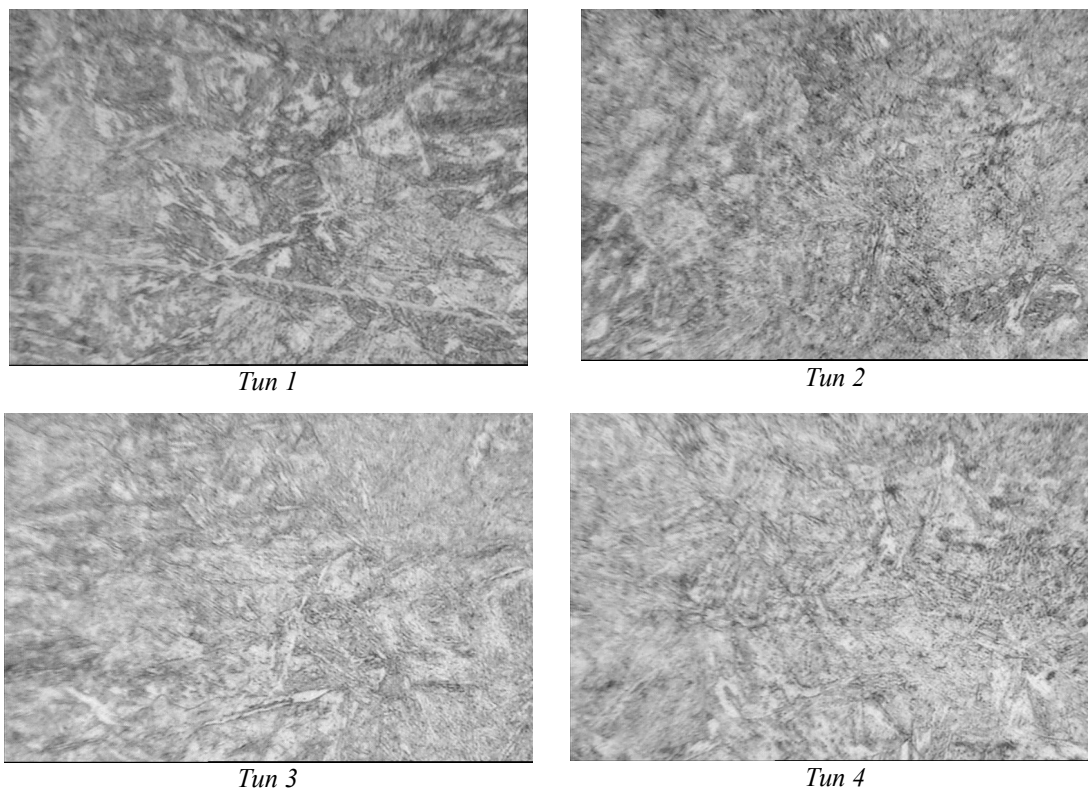


Рис. 3. Фотографии микроструктуры металла сварного шва для образцов различных типов ( $\times 300$ )

Из снимков микроструктуры металла сварного шва видно, что при вибрационной обработке наблюдается снижение неоднородности структуры, ведущее к возможному уменьшению уровня остаточных напряжений и повышению ударной вязкости.

Снимки микроструктуры металла околошовной зоны для различных типов образцов приведены на рис. 4.

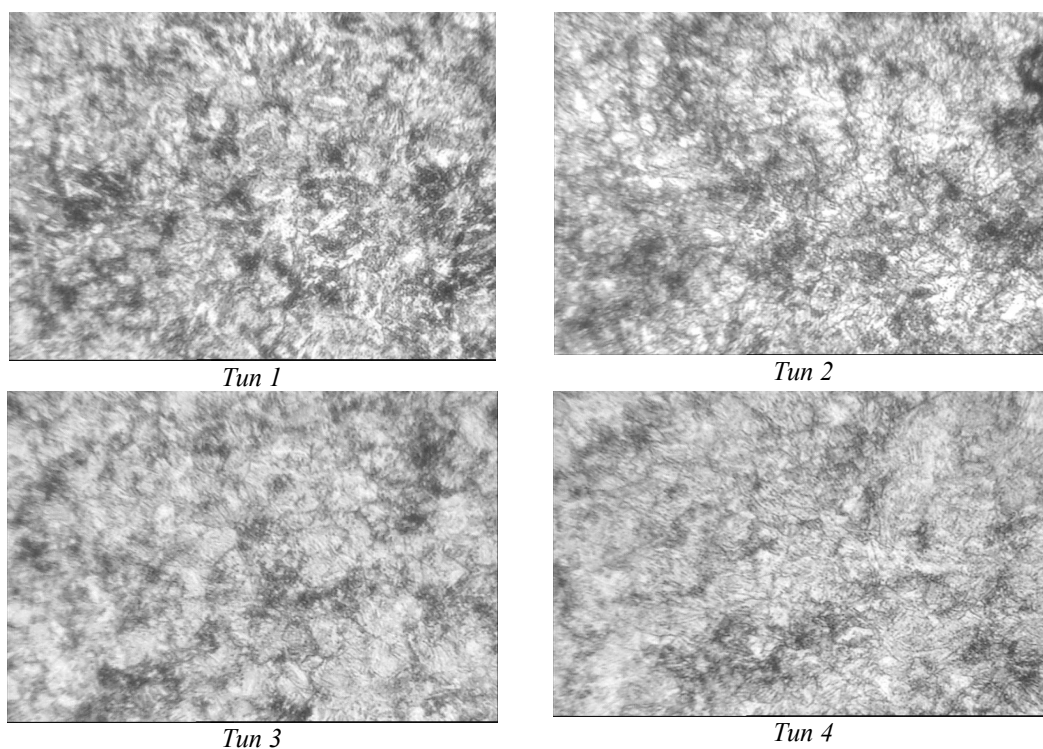


Рис. 4. Фотографии микроструктуры металла околошовной зоны для образцов различных типов ( $\times 300$ )

Из снимков микроструктуры металла околошовной зоны видно, что при сварке на вышеуказанных режимах микродефектов не образуется.

Микроструктурный анализ проводился на компьютере с помощью программы SIAMS 600, с помощью которой определяли средние размеры зерен. Результаты измерений представлены на рис. 5.

Как показывают результаты исследований микроструктуры металла сварного шва, размеры зерен при применении предварительного подогрева получаются больше, чем при использовании вибрационной обработки.

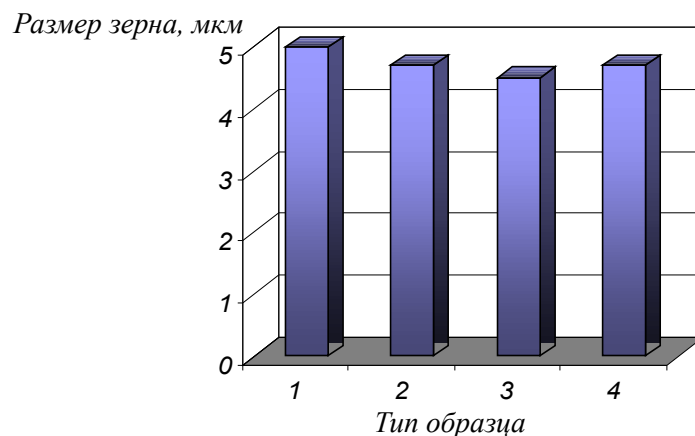


Рис. 5. Диаграмма среднего значения размера зерна металла сварного шва

### Выводы

1. Проведенные исследования показывают, что при замене энерго- и трудоемкого предварительного подогрева на сопутствующую вибрационную обработку обеспечивается технологическая прочность металла сварного соединения из стали 15X5M;

2. Результаты проведенных механических испытаний металла сварного соединения говорят о положительном влиянии сопутствующей вибрационной обработки, которая позволяет снизить твердость металла и размер зерна микроструктуры, а также повысить ударную вязкость металла сварного соединения.

### Литература

1. Халимов А.Г., Бакиев А.В., Зайнуллин Р.С. Работоспособность сварных соединений из стали 15X5M. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1991. 84 с.
2. Халимов А.Г. Исследование свариваемости и разработка технологии сварки нефтеаппаратуры из малоуглеродистых хромистых закаливающих сталей: дисс.... канд. техн. наук. Москва, 1980. 278 с.
3. Сутырин Г.В. Снижение остаточных напряжений сварных соединений низкочастотной вибрационной обработкой // Сварочное производство. 1983. №2. С. 22 - 24.

**TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT  
OF FURNACE COIL PIPES REPAIRING MADE OF STEEL 15Cr5Mo  
WITH APPLICATION OF VIBRATING PROCESSING DURING WELDING**

Haddad Jassem Ali, R.G. Rizvanov, A.M. Fairushin, Y.A. Kolesnikov  
*Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia*  
*e-mail: rizvanov@rusoil.net*

**Abstract.** *This work is devoted to technological development of furnace coil pipe repairing. Technological process of furnace coil pipe repairing made of steel 15Cr5Mo with application of vibrating processing during welding is developed. It based on results of complex, theoretical and experimental researches. Researches of mechanical properties of received welding joints are carried out.*

**Keywords:** *heat treatment, martensite steel, welding construction, cold cracks, vibromechanical treatment, mechanical properties, microstructure, welding seam*

**References**

1. Khalimov A.G., Bakiev A.V., Zainullin R.S. Rabotosposobnost' svarnykh soedinenii iz stali 15Kh5M (Operability of welded joints of steel 15Cr5Mo). Moscow: TSINTIkhimneftemash, 1991. 84 p.
2. Khalimov A.G. Issledovanie svarivaemosti i razrabotka tekhnologii svarki nefteapparatury iz malouglerodistykh khromistykh zakalivayushchikhsya stalei (Study of weldability and development of welding technology units of low-carbon chromium hardening steels). Ph.D. Thesis, Moscow, 1980. 278 p.
3. Sutyurin G.V. Snizhenie ostatochnykh napryazhenii svarnykh soedinenii nizkochastotnoi vibratsionnoi obrabotkoi (Reduction of residual stress of welded joints with help low-frequency vibration treatment). *Svarochnoe proizvodstvo*, 1983, Issue 2, pp. 22 - 24.