

УДК 621.7.044

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБ ИЗ ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ 15X5M

Ризванов Р.Г., Файрушин А.М., Каретников Д.В.
ФГБОУ ВПО Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Уфа
e-mail: deniskar@yandex.ru

Аннотация. В современных условиях нефтепереработки, связанных с растущими требованиями к качеству выпускаемой продукции и обеспечению безопасности процессов, 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 15X5M, технологический процесс сварки которых достаточно сложен. В данной работе приведены исследования механических свойств сварных соединений из стали 15X5M при различных режимах нагружения сварных соединений в процессе сварки, а также экспериментально получены новые результаты по трещиностойкости сварных соединений при повторных нагревах.

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

Характерным объектом широкого применения хромомолибденовой стали марки 15X5M 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 15X5M 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 0,1% 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 (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 и температура окончания мартенситного превращения (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 0,2%. Для предотвращения образования холодных трещин при сварке этих сталей применяют предварительный и сопутствующий подогрев до 300-350°С.

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 15X5M, 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 [1-3].

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 [4, 5].

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 15X5M, используя различные виды обработки, указанные в таблице 1.

Электродуговую сварку производили на следующих режимах: постоянный ток обратной полярности, сила сварочного тока от 95 до 115 А, напряжение 22 В. Источник питания – выпрямитель ВДУ-506. Применяемые электроды – ЦЛ-17 диаметром 3,2 и 4 мм. Вибрационная обработка с частотой 100 Гц производилась с применением пневматического виброустройства ВШ-10. Виброобработка с частотой 50 Гц выполнялась электромеханическим эксцентриковым вибратором.

Испытания проводили на трубных катушках диаметром 219 мм, толщиной 10 мм, вырезанных из змеевика трубчатой печи, находившейся в эксплуатации более 10 лет, и катушках, полученных из новой трубы. Кромки свариваемых катушек были выполнены в соответствии с ГОСТ 16037-80 по типу С17, в соответствии с применяемой в производственных условиях технологией ремонта (рисунок 1).

Так как, при сварке данных сталей существует большая вероятность возникновения холодных трещин, то в нормативной документации указывается необходимость проведения предварительной термической обработки и незамедлительной, после сварки последующей термообработки.

С целью определения механических свойств сварных образцов на всем протяжении цикла сварки, были проведены исследования не только на конечном этапе после заключительной термообработки, но и на межоперационном цикле непосредственно после проведения сварочных операций.



Рисунок 1. Фотографии образцов для сварки

После сварки были проведены визуальный контроль, цветная дефектоскопия и рентгенографический контроль сварных швов, результаты которых показали отсутствие трещин в сварных соединениях.

Для проведения исследования по определению уровня микронапряжений в сварном шве были изготовлены образцы из сваренных заготовок.

Рентгеноструктурный анализ образцов проводился на рентгеновском дифрактометре «ДРОН-3М» в CoK_α излучении с графитовым монохроматором на дифрагированном пучке. Обработку экспериментальных данных проводили с использованием программного пакета «Maud». Алгоритм программы использует метод Ритвельда. Преимущество данного метода заключается в том, что такие несовершенства кристаллов, как дефекты, двойникование не создают погрешности измерения.

Таблица 1. Типы и режимы обработки образцов

Тип образца	Вид сопутствующей обработки при сварке образцов	Послесварочная термообработка (высокий отпуск)
1	Вибрационная обработка при частоте 100 Гц амплитуде 0,1...0,2 мм	нет
2	Вибрационная обработка при частоте 50 Гц амплитуде 0,4...0,6 мм	нет
3	Сварка с предварительным подогревом при температуре 300-350°C.	нет
4	Сварка без предварительного подогрева	нет
5	Вибрационная обработка при частоте 100 Гц амплитуде 0,1...0,2 мм	да
6	Вибрационная обработка при частоте 50 Гц амплитуде 0,4...0,6 мм	да
7	Сварка с предварительным подогревом при температуре 300-350 °C	да
8	Сварка без предварительного подогрева	да

Результаты рентгеноструктурного анализа остаточных микронапряжений в исследуемых образцах сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Результаты исследования микронапряжений

Тип образца	Основной металл	Сварной шов							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Величина микронапряжений, МПа	101,0	569,7	499,5	495,9	540,0	151,9	146,9	135,0	179,6

Из полученных результатов видно, что на межоперационном цикле до проведения послесварочной термообработки минимальный уровень остаточных напряжений наблюдается в образцах, выполненных с вибрационной обработкой при частоте 50Гц и амплитуде 0,4..0,6 мм и при использовании предварительного подогрева. После проведения послесварочной термообработки уровень напряжений в образцах становится значительно ниже и по значениям приближается к уровню остаточных напряжений в основном металле.

Далее из трубных катушек были вырезаны образцы для испытаний на ударный изгиб (согласно ГОСТ 6996 – 66 тип IX), 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 – 10 мм, высота рабочего сечения - 10 мм. Результаты испытаний на ударный изгиб образцов, полученных при различных видах сопутствующей обработки в процессе сварки, показаны на рисунке 2. Как видно из результатов испытаний, ударная вязкость металла сваренных образцов до термообработки независимо от вида обработки отличается незначительно. Разность значений лежит в пределах 12%. После проведения отпуска ударная вязкость в образцах, выполненных с вибрационной обработкой при частоте 50Гц и амплитуде 0,4..0,6 мм, возрастает относительно других способов обработки в сварном шве на 14..17% в зоне термического влияния на 6..8%.

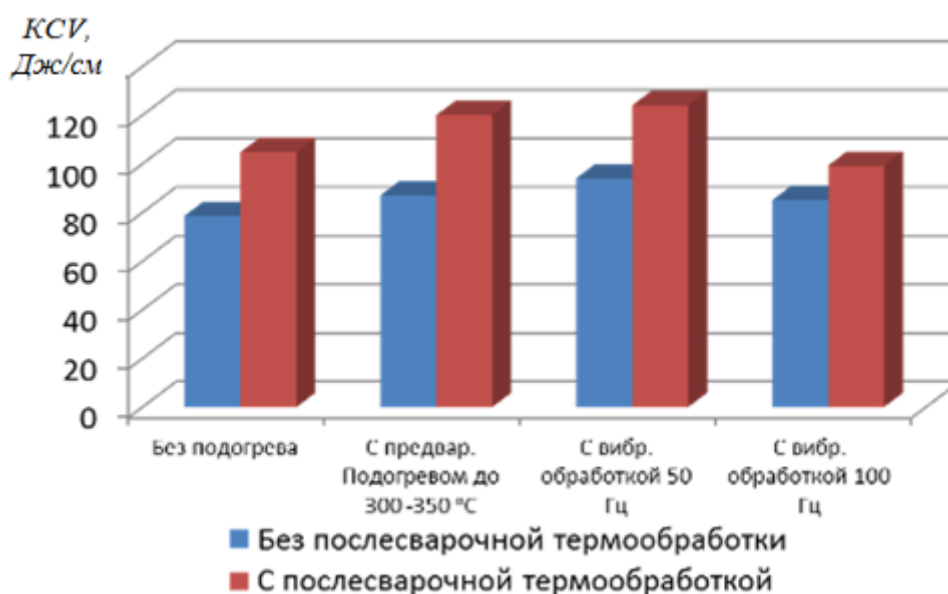


Рисунок 2. Диаграмма средней величины ударной вязкости металла сварных швов

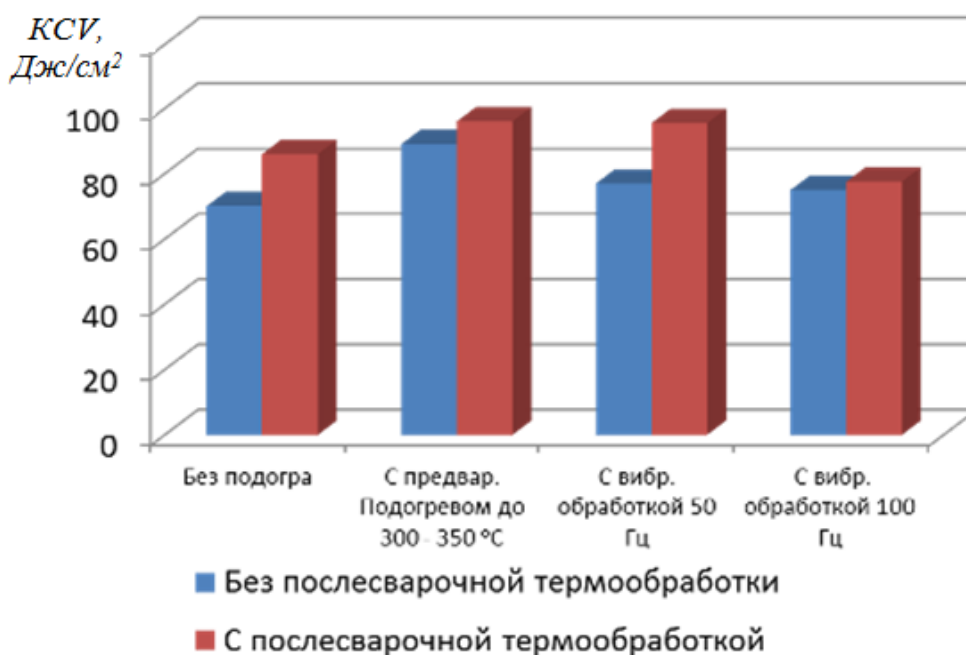
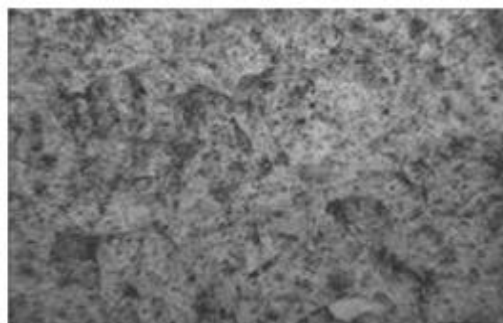


Рисунок 3. Диаграмма средней величины ударной вязкости околошовной зоны

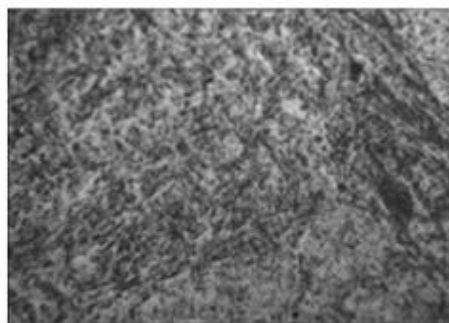
С целью изучения изменения структуры металла в сварном шве и околошовной зоне в зависимости от вида и режима обработки в процессе сварки было проведено металлографическое исследование образцов. Исследуемые образцы после полирования подвергли травлению в насыщенном спиртовом растворе азотной кислоты. Для исследования микроструктуры использовался оптический микроскоп МЕТАМ РВ-22 с увеличением $\times 400$. Полученные на

микроскопе фотографии обрабатывались на компьютере с помощью программы SIAMS 600.

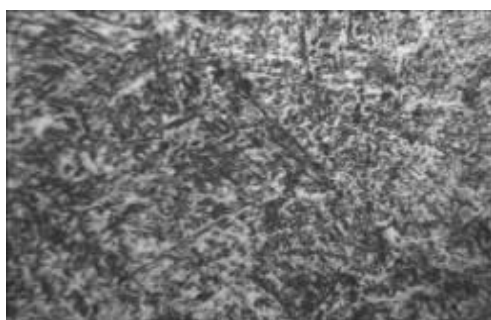
Фотографии микроструктуры металла сварного шва в поперечном сечении для различных типов образцов представлены на рисунке 4.



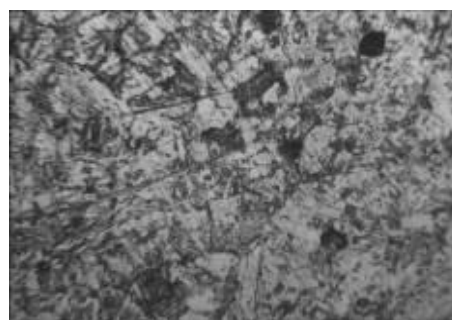
Вибрационная обработка при частоте 100 Гц амплитуде 0,1...0,2 мм с послесварочной термообработкой



Вибрационная обработка при частоте 50 Гц амплитуде 0,4...0,6 мм с послесварочной термообработкой



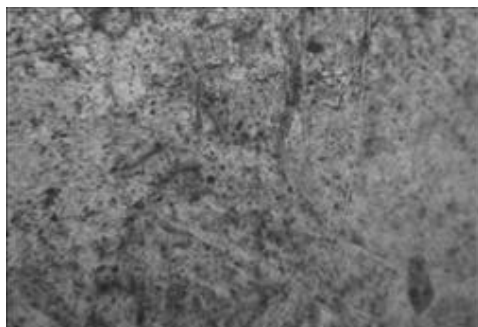
Сварка с предварительным подогревом при температуре 300-350°C с послесварочной термообработкой



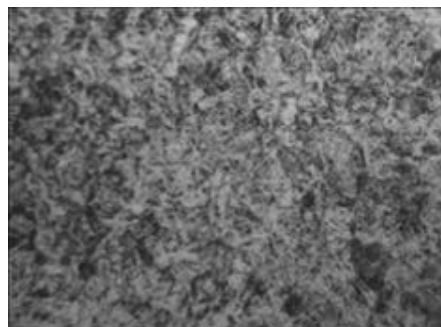
Сварка без предварительного подогрева с послесварочной термообработкой

Рисунок 4. Фотографии микроструктуры металла сварного шва для образцов различных типов ($\times 400$)

Фотографии микроструктуры металла околошовной зоны приведены на рисунке 5.



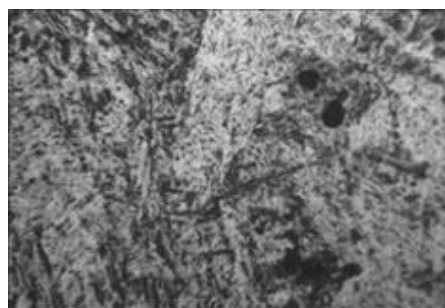
Вибрационная обработка при частоте 100 Гц амплитуде 0,1...0,2 мм с послесварочной термообработкой



Вибрационная обработка при частоте 50 Гц амплитуде 0,4...0,6 мм с послесварочной термообработкой



Сварка с предварительным подогревом при температуре 300-350°C с послесварочной термообработкой



Сварка без предварительного подогрева с послесварочной термообработкой

Рисунок 5. Фотографии микроструктуры металла околошовной зоны для образцов различных типов ($\times 400$)

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.

Измерение микротвердости металла сварного соединения проводили на микротвердомере ПМТ-3. Замеру подвергались участки сварного соединения – сварной шов, зона термического влияния и основной металл. Для точности результата в каждой зоне производили по 3 замера. Точки измерения микротвердости располагались с шагом 50 мкм. Результаты замеров приведены на рисунках 6 и 7.

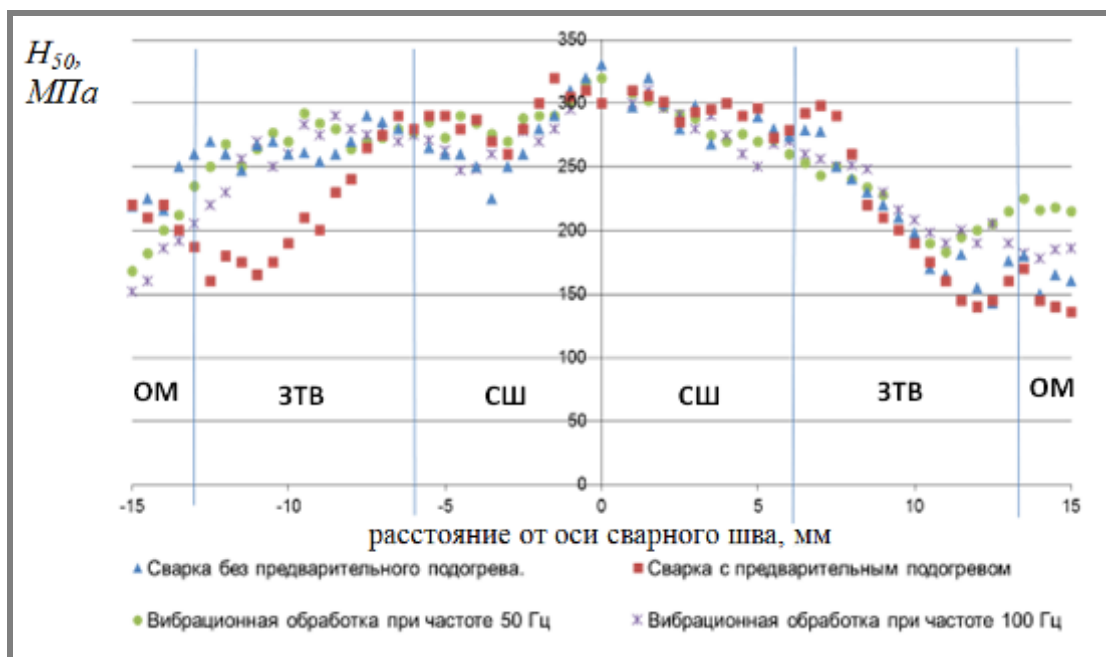


Рисунок 6. Графики распределения микротвердости в металле сварного соединения в зависимости от вида обработки

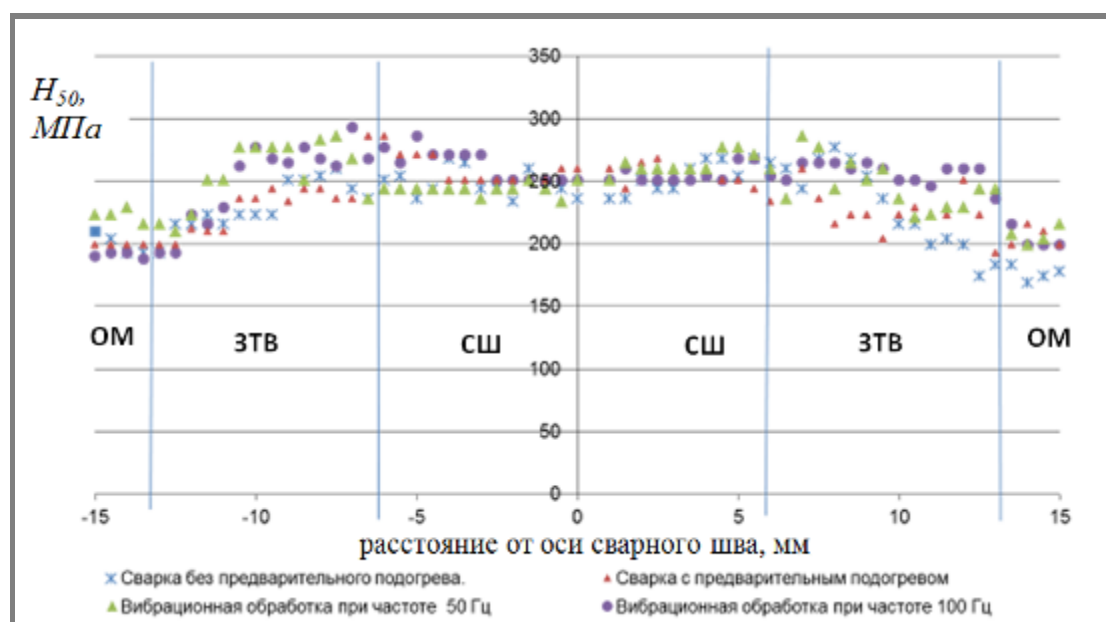


Рисунок 7. Графики распределения микротвердости в металле сварного соединения в зависимости от вида обработки

Как видно из рисунков 6 и 7, при замене предварительного подогрева на сопутствующую виброобработку твердость металла изменяется незначительно.

Распределение микротвердости в металле сварного соединения на межоперационном цикле показывает, что твердость в металле сварного соединения превышает нормативные значения.

Распределение микротвердости в металле сварного соединения после проведения послесварочной термообработки показывает, что применение вибрационной обработки снижает твердость, особенно это заметно в зоне термического влияния. Объясняется это может двумя причинами: первое - это общее снижение уровня остаточных напряжений в конструкции и второе – это повышение интенсивности аустенитно-мартенситных превращений при использовании вибрационной обработки.

Для испытания на статическое растяжение были вырезаны образцы по ГОСТ 9669 (для определения механических свойств сварных соединений – образцы – типа XIII, для определения механических свойств металла сварных швов – типа XXV). Испытания проводились на разрывной машине ИР 5113 –100 при температуре 20 °С. По результатам испытаний на растяжение построены диаграммы зависимости предела прочности металла сварного шва (рисунок 8) и сварного соединения (рисунок 9) от вида обработки во время сварки.

При испытаниях сварных соединений на растяжение разрушение образцов происходило по основному металлу. Это даёт основание считать, что при данных режимах сварки при сопутствующей вибрационной обработке, как металл шва, так и металл околошовной зоны имеют прочностные характеристики не ниже, чем основной металл.

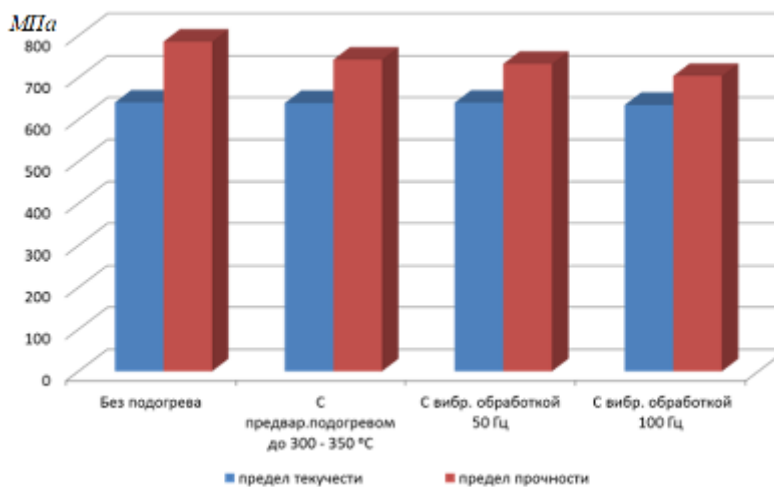


Рисунок 8. Предел прочности и условный предел текучести металла сварного шва

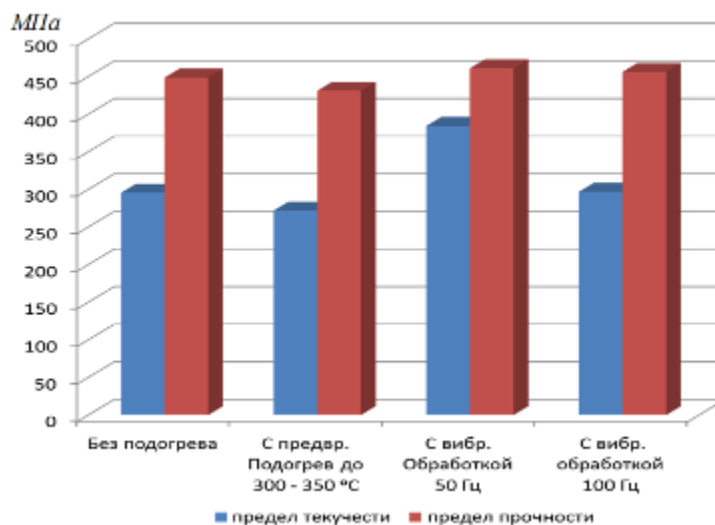


Рисунок 9. Предел прочности и условный предел текучести металла сварного соединения

Результаты испытаний сварного шва на статическое растяжение показывают, что при использованных режимах вибрационной обработки в процессе сварки металл шва имеет прочностные характеристики аналогичные металлу сварного шва, полученному по существующей технологии сварки стали 15Х5М, то есть с применением предварительного и сопутствующего подогрева с последующим высоким отпуском.

Так как, условие эксплуатации данной стали предусматривает работу при высоких температурах, в работе были проведены испытания металла сварного шва на статическое растяжение при высокой температуре. Для дальнейших исследований была выбрана наиболее оптимальная по частоте и амплитуде вибрации обработка – частота 50Гц, амплитуда – 0,4..0,6 мм.

Исследование проводилось с целью определения влияния режима обработки в процессе сварки на прочность металла сварного шва при высокой температуре. Температура испытаний определялась из возможного условия эксплуатации данной стали – 500 °С, скорость нагружения 2 мм/мин. Испытание на растяжение проводилось на испытательной машине “Instron 5982“. Образцы изготавливались в соответствии с ГОСТ 6996 (тип XXV).

По результатам испытаний построена диаграмма зависимости предела прочности металла сварного шва от вида обработки при проведении сварочных операций (рисунок 10)

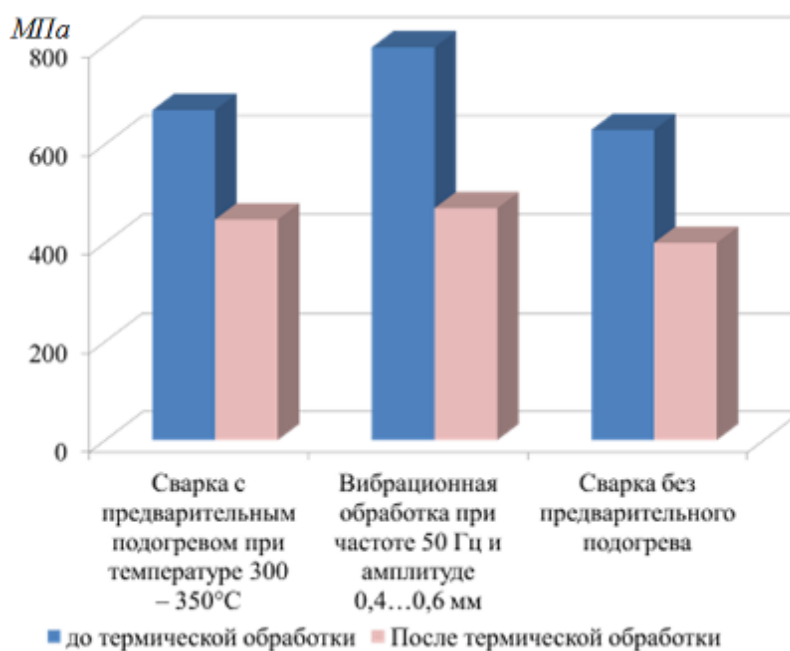


Рисунок 10. Предел прочности металла сварного шва из стали 15X5M при температуре испытания 500 °С

Результаты испытаний сварного шва и сварного соединения на статическое растяжение показывают, что предел прочности при температуре 500 °С при использовании вибрационной обработки в процессе сварки до проведения термообработки в среднем на 13 % выше, чем по существующей технологии с сопутствующим подогревом, а после проведения термической обработки на 11 %. По сравнению со сваркой без подогрева предел прочности повышается на 18% и 15% соответственно.

Также в работе были проведены исследования образцов на трещиностойкость при повторных нагревах. Испытания сварных соединений при высоких температурах с постоянными нагрузками или скоростями деформации предназначены, в первую очередь, для определения их жаропрочных свойств при высокотемпературной эксплуатации. Однако их можно использовать и для оценки склонности к образованию трещин при термической обработке, так как поведение сварных соединений при термической обработке подчиняется общим закономерностям деформации ползучести.

Для сварных соединений низколегированных сталей эффективными являются так называемые разнородные пробы, в которых дополнительное подгружение осуществляется за счет разниц коэффициентов линейного расширения испытываемого металла и жесткой основы из аустенитной стали, к которой пробу приваривают перед тем, как ее поместить в печь. При одинаковых режимах испытания склонность к растрескиванию разнородных проб с дополнительным подгружением существенно больше.

Для исследования из трубных образцов стали 15Х5М диаметром 159 мм, толщиной 10 мм и длиной 250 мм сваренных на двух режимах, указанных в таблице 3, были изготовлены разнородные пробы, в которых дополнительное подгружение при подогреве осуществлялось за счет жесткой основы из аустенитной стали 12Х18Н10Т, пластины с размером 100×10×285 мм. Далее пробы нагревали в печи изменяя температуру от 200 до 600 °С с выдержкой на каждом интервале в течении 1 часа. В случае если образец не разрушался при первом нагреве до 600 °С, то через 30 минут остывания в комнатных условиях производили дополнительный нагрев при температуре 600 °С. Таким образом, образцы нагружали в несколько циклов до появления трещины.

Результаты испытаний, показывают, что трещиностойкость металла шва образцов, полученных с вибрационной обработкой, существенно повышается по сравнению с существующей технологией изготовления.

Таблица 3. Результаты испытаний на трещиностойкость

Вид сопутствующей обработки при сварке	Количество циклов до появления трещины
Сварка с предварительным подогревом при температуре 300 – 350 °С	2
Сварка с вибрационной обработкой при частоте 50 Гц, амплитуде вибрации 0,4 – 0,6 мм	5

Выводы

1. Результаты определения остаточных напряжений в сварном шве показывают, что на межоперационном цикле до проведения послесварочной термообработки минимальный уровень остаточных напряжений наблюдается в образцах, выполненных с вибрационной обработкой при частоте 50 Гц и амплитуде 0,4 – 0,6 мм, а также при использовании предварительного подогрева.

2. Результаты испытаний сварного шва и сварного соединения на статическое растяжение при высоких температурах (500 °С) показывают, что прочностные характеристики сварного шва при использовании вибрационной обработки в процессе сварки до проведения термообработки в среднем на 16 % выше, чем по существующей технологии, а после проведения термической обработки – на 11 %. По сравнению со сваркой без подогрева предел прочности повышается на 21% и 15% соответственно.

3. Результаты испытаний на трещиностойкость при повторных нагревах показывают, что трещиностойкость металла шва образцов, полученных с вибрационной обработкой вместо существующей технологии подогрева, существенно повышается.

Литература

1. Земзин В.Н., Шрон Р.З. Термическая обработка и свойства сварных соединений. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1978. 367 с.
2. Халимов А.Г. Исследование свариваемости и разработка технологии сварки нефтеаппаратуры из малоуглеродистых хромистых закаливаемых сталей: дис... канд. техн. наук. М., 1980. 278 с.
3. Работоспособность сварных соединений из стали 15Х5М/ Халимов А.Г. и др. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1991. 84 с.
4. Эффективность методов снижения остаточных сварочных напряжений. / Недосека А.Я., и др. // Автоматическая сварка. 1974. №3. С. 66-69.
5. Сутырин Г.В. Снижение остаточных напряжений сварных соединений низкочастотной вибрационной обработкой // Сварочное производство. 1983. №2. С. 22-24.
6. О влиянии параметров вибрационной обработки на свойства металла сварного соединения. / Файрушин А.М. и др. // Нефтегазовое дело. 2011. Т. 9, №2. С. 70-75.

RESEARCH OF VIBRATION TREATMENT EFFECT ON THE STRESS-STRAIN PROPERTIES AND FRACTURE STRENGTH OF PIPE WELDING JOINTS OF 15CR5MO CREEP-RESISTING STEEL

R.G. Rizvanov, A.M. Fairushin, D.V. Karetnikov
FSBEI Ufa state oil technical university
e-mail: deniskar@yandex.ru

Abstract. Nowadays terms of equipment function are getting more exaggerate and material mix are expanding. The main reason of this processes is enhancement requirements of petroleum product. Essential part of apparatus for high-temperature processes in oxidizing hydrogen-sulphidous places is made of creep-resisting chrome-molybdenum steel 15Cr5Mo. Welding of this steel is rather compound process. Results of the research of welding joints stress-strain properties loaded in range shifting and fracture strength factors of welding joints are shown in this work.

Keywords: heat processing, martensitic steel, welded fabrication, cold crack, vibration treatment, stress-strain properties, microstructure, weld seam

References

1. Zemzin V.N., Shron R.Z. Heat treatment and properties of welded joints - L: Mechanical Engineering. Leningrad. Dep-tion, 1978. 367 p.
2. Khalimov A.G. Study of weldability and welding technology development of low-carbon chromium oil equipment hardening steels: Dis. cand. tech. science., 1980. 278 p.
3. Khalimov A.G. The efficiency of welded joints of steel 15Cr5M. M.: Himneftemash, 1991. 84 p.
4. Effective ways to reduce the residual welding stresses. / Nedoseka A.J. // Automatic welding. 1974. № 3. P. 66-69.
5. Sutyurin G.V. Reduction of residual stress of welded joints of low-frequency vibration treatment // Welding manufacture, 1983. № 2. P. 22-24.
6. Effect of vibration processing parameters on the properties of the metal joint. / Fayrushin A.M. // Oil and gas business. 2011. T. 9, № 2. P. 70-75.

Сведения об авторах

1. Ризванов Р. Г., д-р техн. наук, доцент, проф. кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», ФГБОУ ВПО УГНТУ.

R. G Rizvanov dr. of tech., associate prof of department «Petroleum vessel manufacturing», FSBEI USPTU

e-mail: rifriz@mail.ru

2. Файрушин А. М., канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», ФГБОУ ВПО УГНТУ.

A. M Fairushin, PhD tech. sci , associate professor of Petroleum vessel manufacturing department FSBEI USPTU

e-mail: tna_ugntu@mail.ru

3. Каретников Д. В., аспирант кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», ФГБОУ ВПО УГНТУ.

D. V. Karetnikov, lecturer of department «Petroleum vessel manufacturing» FSBEI USPTU

e-mail: deniskar@yandex.ru