

На правах рукописи

Сорокин Александр Евгеньевич

Повышение хладостойкости сварных соединений труб малого и среднего диаметра, выполненных сваркой токами высокой частоты

2.5.8. - Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2026 г.

Работа выполнена в АО «Выксунский металлургический завод»

Научный руководитель: доктор технических наук
ЭФРОН Леонид Иосифович
АО «ОМК», научный руководитель Дирекции по
развитию технологий и продуктов

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
ЕФИМЕНКО Любовь Айзиковна
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина,
профессор

кандидат технических наук
КОРОЛЕВ Сергей Анатольевич
МГТУ им. Н.Э. Баумана, доцент

Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «СПбПУ»**

Защита состоится «25» июня 2026 года в 14:30 на заседании диссертационного совета 24.2.331.20 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: 8 (499) 267-66-33, доб 4057

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <https://bmstu.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 2026 года

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н



А.С. Панкратов

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Основными достоинствами метода контактной сварки давлением с нагревом токами высокой частоты (ТВЧ) являются высокая скорость сварки и меньший, по сравнению с дуговой сваркой, удельный расход электроэнергии, низкое тепловложение и высокая производительность.

В последние годы к вязкости и хладостойкости сварных соединений (СС) труб, выполненных сваркой ТВЧ, предъявляются повышенные требования при испытании поперечных образцов на ударный изгиб. Анализ нормативных документов показывает постоянное ужесточение требований к испытаниям СС в сторону отрицательных температур. На сегодняшний день практически все основные компании топливно-энергетического комплекса Российской Федерации (ТЭК РФ) предъявляют требования к проведению испытаний СС на поперечных образцах при пониженной температуре и их количество, постоянно увеличивается.

При ужесточении требований к качеству СС труб, в особенности изготовленных из низколегированных и коррозионностойких марок стали, сваренных ТВЧ, повышаются и требования к стабильности сварочного процесса. Речь при этом, как правило, уже не идёт о грубых отклонениях, приводящих к появлению в швах непроваров и трещин, способных возникать в них при холодной сварке и перегреве кромок. Современные трубоэлектросварочные агрегаты позволяют практически избегать появления этих макро-дефектов. А если даже они и появляются, то достаточно надёжно отбраковываются средствами неразрушающего контроля (НК). Иначе обстоит дело с дефектами типа неметаллических включений (НВ). Их наличие в СС может приводить к провалам испытаний на сплющивание, загиб, ударную вязкость, коррозионную стойкость. Размеры НВ, как правило, таковы, что они не выявляются средствами НК на предусмотренных стандартами режимах.

Для максимального снижения количества включений в швах труб, сваренных ТВЧ, необходимо с одной стороны правильно выбирать химический состав и свойства исходного металла, а с другой стороны устанавливать и поддерживать оптимальный сварочный режим. В заводской практике, однако, нередко случаи, когда влияние одного из этих факторов неоправданно выпячивается, что затрудняет поиск истинных причин ухудшения качества швов.

Указанную выше проблему можно было бы максимально снизить при наличии устройств, позволяющих достаточно точно оценивать характер протекания сварочного процесса. К сожалению, имеющееся на сегодняшний день в цехах завода и мировой практике сварочное оборудование, не способно достаточно надёжно решить эту задачу.

В связи с вышеизложенным, в условиях трубоэлектросварочных цехов АО «ВМЗ» необходимо разработать технологию сварки и термообработки, обеспечивающие отсутствие НВ в СС труб ТВЧ, а также разработать и внедрить устройства мониторинга процесса высокочастотной сварки для повышения хладостойкости СС.

Начиная с 2013 года в АО «ВМЗ» проводится высокоскоростная видеосъёмка сварочных процессов в цехах, производящих трубы с нагревом кромок ТВЧ. За прошедшее с этого момента время получена достаточно обширная информация о

деталей этих процессов. Выводы, полученные после обработки этой информации, позволили приступить и к выполнению работ по данной теме.

Целью настоящей работы является повышение хладостойкости СС за счёт установления закономерностей их формирования при высокочастотной сварке, взаимосвязи параметров высокочастотной сварки с качественными характеристиками СС, разработка и внедрение способов управления высокочастотной сваркой.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. установить структурные механизмы, определяющие хладостойкость и вязкость СС, полученных сваркой ТВЧ;
2. установить взаимосвязь параметров образования сварочных перемычек, в том числе частоты их образования, интервалов между последовательными перемычками, с качественными показателями СС;
3. установить характер процессов, проходящих при различных типах сварки ТВЧ, установить особенности и закономерности формирования СС труб;
4. установить влияние технологических параметров высокочастотной сварки на свойства СС;
5. разработать способ и устройство, позволяющие получать информацию об особенностях процессов, проходящих вблизи точки схождения свариваемых кромок в промышленных условиях;
6. разработать и внедрить в АО «Выксунский металлургический завод» технологию производства труб малого и среднего диаметра с гарантированной ударной вязкостью СС.

Объектом исследований являлся процесс высокочастотной сварки труб из углеродистых и низколегированных сталей и СС, выполненные из них.

Предмет исследований:

- процессы, происходящие при высокочастотной сварке, в том числе, явление образования сварочных перемычек и их взаимосвязи с качественными характеристиками и свойствами СС;
- параметры высокочастотной сварки труб, в том числе после сварочная термообработка СС;
- способы, позволяющие осуществлять мониторинг процесса высокочастотной сварки.

В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. Показано, что термический цикл сварки труб ТВЧ из низкоуглеродистой стали не ухудшает ударную вязкость, а деформационное воздействие и изгиб волокон металла, характерный для сварки ТВЧ – приводит к рассеянию результатов испытаний на ударный изгиб.
2. Установлены два способа сварки труб улучшающие качество СС, которые можно использовать в зависимости от состава технологического оборудования и сортамента изготавливаемых труб:
 - отчистка СС от оксидных включений путём управления закономерностями движения перемычек (частота, интервалы между перемычками);

- удаление оксидных включений при увеличении угла схождения за счёт увеличения скорости осадки, уменьшении времени нагрева и соответствующее снижению толщины окисной плёнки.

3. В технологии сварки ТВЧ установлены детали процессов, проходящие вблизи точки схождения кромок, характеризующие особенности и закономерности формирования СС труб ТВЧ:

- установлено наличие взаимосвязи частоты образования перемычек с типом сварочного процесса и качественными характеристиками СС. Показано, что наилучшие результаты ударной вязкости достигаются в случае сварки с частотой образования перемычек 200-300 Гц.

- установлена связь нерегулярности движения перемычек с наличием неметаллических включений в СС. При увеличении интервала между последовательными перемычками в СС появляются короткие участки, на которых не было очищающего действия быстро движущихся перемычек, а заполнение зазора на этих участках происходит за счёт возврата в него окислённого металла с кромок.

- выявлена связь увеличенного интервала между перемычками с их образованием вдали от точки схождения. На частоту образования отклонений от стандартного интервала между перемычками влияет, прежде всего, величина сварочной мощности, которую целесообразно выбирать и контролировать с учётом наличия и/или отсутствия отклонений.

- экспериментально установлено снижение уровня ударной вязкости СС при увеличении временного интервала между образованием перемычек. Проведённые исследования показали, что на участках, на которых интервалы между последовательными перемычками превышают 8 мс, в СС остаются сварочные оксиды, которые могут приводить к снижению ударной вязкости СС.

4. Установлено, что сварка труб с углом схождения кромок 7^0 позволяет практически полностью устранить сварочные оксидные НВ в СС. Показано, что капли жидкого металла появляются на кромках только за 5-10 мм до их смыкания (в отличие от сварки при угле схождения $4^0 - 50-70$ мм), уменьшая тем самым время нагрева. Снижение времени нагрева способствует уменьшению толщины окисной плёнки на поверхности металла перед сваркой.

Практическая значимость и реализация результатов работы.

Разработанные технические решения (система мониторинга сварки ТВЧ, сварка при оптимальном характере и движении перемычек, сварка с оптимальной частотой тока генератора, сварка с повышенными УСК, оптимальная последовательность параметров локальной (ЛТО) и объемной термообработки (ОТО) успешно внедрены в трубоэлектросварочных цехах АО «ВМЗ», в частности при производстве труб на ТЭСА 60-178, ТЭСА 114-245 и ТЭСА 203-530. При этом обеспечена ударная вязкость СС при температуре до -60^0C .

По разработанному комплексу технических решений произведено и отгружено для ПАО «Газпром», ПАО «Траснефть» и ПАО «Новатек» свыше 100 тыс. т. хладостойких нефтегазопроводных труб и обсадных труб диаметром 114-530 мм с толщиной стенки 5-12,7 мм. Экономический эффект составил 150 млн. руб.

Достоверность результатов. Достоверность результатов исследований обеспечивается их проведением на современном сертифицированном оборудовании, с применением современных методов исследований механических свойств стали и СС. Обоснованность выводов и результатов экспериментальных исследований подтверждена большим объёмом выполненных экспериментов, а также результатами производства промышленных партий труб в АО «ВМЗ».

По представленной работе на защиту выносятся:

1. Установленные закономерности формирования СС труб, выполненных высокочастотной сваркой;
2. Выявленные механизмы возникновения НВ в СС, связанные с нерегулярностью движения перемычек и разработанные методы мониторинга процессов высокочастотной сварки;
3. Предложенные методы улучшения ударной вязкости СС за счёт оптимизации параметров сварки;
4. Разработанная технология термической обработки СС труб, выполненных высокочастотной сваркой;
5. Сформулированная концепция управления процессом сварки ТВЧ, структурой и свойствами сварного соединения труб малого и среднего диаметра;
6. Положительные результаты производства промышленных партий труб с обеспечением требований к хладостойкости СС.

Личный вклад автора. Автор непосредственно участвовал в постановке работы, формулировке задач, планировании, организации исследований, разработке методик и проведении экспериментов, обработке и анализе экспериментальных данных, установлении закономерностей формирования СС, а также участвовал во внедрении разработок.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертации были доложены и обсуждены на 8 конференциях: 2-ой конференции молодых специалистов «Металлургия XXI века», г. Москва, АХК ВНИИМЕТМАШ, 2006 г.; 2-ой Научно-практической Конференции молодых специалистов ОМК, г. Выкса, 2009 г.; XI Научно-практической Конференции молодых специалистов ОМК им С.З. Афонина, г. Выкса, 2018 г.; V Международной научной конференции «Сварка и родственные технологии для изготовления оборудования специального и ответственного назначения», ГНЦ РФ «НПО ЦНИИТМАШ», г. Москва, 2023 г.; XXV Международной научно – практической конференции «Трубы 2023», г. Челябинск, 2023 г.; 23-ей Научно – практической конференции «Новые перспективные материалы, оборудование и технологии для их получения», г. Москва. 2024 г.; I Всероссийской научно – технической конференции (с международным участием) «Сварка и диагностика», МГТУ им Н.Э. Баумана, г. Москва, 2024 г.; Научно – практической конференции «Сварка и родственные технологии при изготовлении изделий, работающих в экстремальных и особых условиях», НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей», г. Санкт – Петербург, 2025 г.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 13 научных работах, 6 из которых в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, а также получено 3 патента на изобретение РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 7 глав, общих выводов, списка литературы из 140 наименований, содержит 172 страницы машинописного текста, 95 рисунков, 16 таблиц.

Содержание работы

Во введении отражена актуальность, поставлена цель и сформулированы задачи исследования, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе рассмотрены и проанализированы требования, предъявляемые к СС труб ТВЧ, особенности технологии сварки и термообработки труб, а также подходы к разработке систем мониторинга процесса сварки ТВЧ. Актуальными направлениями исследований являются установление особенностей и закономерностей формирования СС, влияние параметров сварки и ТО на структуру и вязкость СС. Немаловажным направлением является разработка способа управления процессом высокочастотной сварки путём выделения и обработки информации о сварочных перемычках.

Во второй главе выбраны и обоснованы материалы и методы исследования. В качестве материалов выбраны низколегированные стали, применяемые для изготовления труб малого и среднего диаметра, выполненных сваркой ТВЧ. Более детально информация о химических составах представлена в тексте диссертации. Имитацию термических циклов и деформационного воздействия сварки проводили с использованием комплекса Gleeble 3180. Исследование процессов, проходящих вблизи свариваемых кромок, осуществляли с использованием скоростной видеокамеры FASTEC IL3 с объективом Makro-Planar 2/100 ZF2 и полосовым светофильтром 900 нм. Для установления связи образования перемычек с качественными характеристиками СС использовался метод графического представления временных интервалов между перемычками. Исследование связи угла схождения кромок (УСК) выполняли за счёт изменения ширины шовонаправляющего вала или изменения его расстояния от точки сварки. После сварки СС подвергали локальной (ЛТО) и/или объёмной (ОТО) термообработке, а также их сочетанию по различным режимам.

Третья глава посвящена исследованию структуры, ударной вязкости и факторов, охрупчивающих СС ТВЧ.

Показано, что ЛС представляет собой узкую обезуглероженную зону шириной 100-200 мкм в которой наблюдаются крупные зерна феррита полигональной и квазиполигональной морфологии. За пределами ЛС происходит заметный рост твердости, что обусловлено формированием бейнита. По мере удаления от линии сплавления происходит снижение количества бейнитной составляющей и рост объёмной доли феррита. В области термомеханического влияния заметных структурных изменений по сравнению с ОМ не обнаружено.

В крупнозернистой области ЛС и примыкающей к ней крупнозернистой ферритно-бейнитной области, обнаружено увеличение количества зерен α -фазы, у которых кристаллографическая плоскость ориентирована параллельно поверхности разрушения. Доля потенциальных фасеток скола в этих областях в 2,5-3 раза больше, чем на расстояниях 1 мм и далее от ЛС.

Ударная вязкость СС характеризуется большим разбросом в сравнении с ОМ, что обусловлено большим числом и степенью влияния дополнительных охрупчивающих факторов (Рисунок 1).

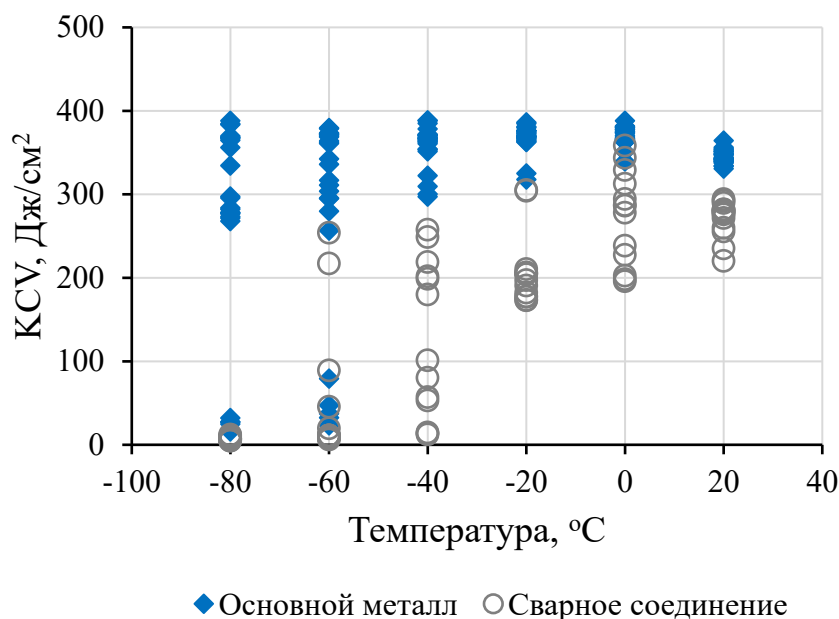


Рисунок 1.

Ударная вязкость сварного соединения и основного металла труб размером 426×12 мм из стали 05ХГБ

Рассеяние ударной вязкости резко снижается при удалении на 1 мм и более от ЛС. Установлено, что если ударная вязкость СС существенно ниже ударной вязкости ОМ труб, то максимальный разброс значений имеет место при совпадении оси надреза с ЛС. При расположении надреза относительно СС более чем на 1 мм результаты испытаний становятся идентичными с результатами испытаний ОМ труб, что обусловлено снижением влияния текстуры, размера зерна и НВ.

Установлены наиболее сильные факторы, охрупчивающие СС:

- Сварочные окислы являются наиболее сильным охрупчивающим фактором, определяющим вязкость СС;
- Степень охрупчивания линзовидных неметаллических включений зависит от окружающей микроструктуры;
- При отсутствии неметаллических включений охрупчивающее влияние на металл оказывает формирование обезуглероженной области ферритной микроструктуры с повышенными размером зёрен и неблагоприятной кристаллографической текстурой.

Четвертая глава включает исследование особенностей формирования СС ТВЧ.

Характерными особенностями сварки ТВЧ являются локальный, скоротечный ТЦ и формирование в зоне термического влияния, под действием сварочных деформаций и нагрева - «изгиба волокон». Результаты испытаний на ударный изгиб имитированного СС без деформации и имитированного СС с деформацией, показали (Рисунок 2), что ТЦ (скорость охлаждения $\sim 10^2$ °C/c) и, соответственно, формирующаяся микроструктура при сварке труб ТВЧ не являются основным

фактором, определяющим вязкость и хладостойкость СС труб из низкоуглеродистой стали.

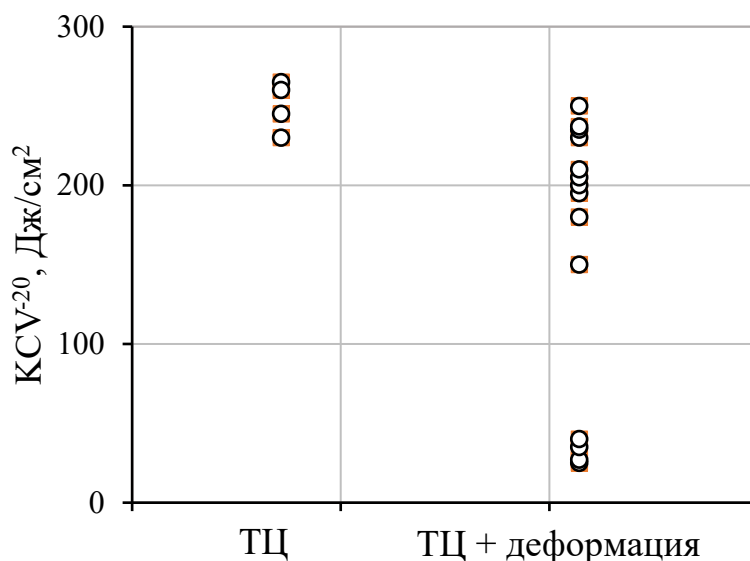


Рисунок 2.

Сравнение результатов испытаний на ударную вязкость СС образцов после имитации сварочного ТЦ и образцов после имитации ТЦ с деформацией

Изгиб волокон металла оказывает неблагоприятное влияние на вязкость СС вследствие преимущественного расположения межфазных границ вдоль плоскости разрушения в отличие от ОМ. Таким образом, ТЦ не ухудшает ударную вязкость, а деформационное воздействие и изгиб волокон металла, характерный для сварки ТВЧ – приводит к рассеянию результатов испытаний на ударный изгиб СС труб из низкоуглеродистой стали.

Как показали проведенные исследования сварки труб ТВЧ с углами схождения 3-4°, форма схождения кромок при оптимальном нагреве носит двухфазный вид (то есть угол различается в зависимости от расстояния до точки схождения кромок). При приближении к точке сварки угол схождения за счет оплавления кромок уменьшается, а затем образуется узкая сварочная щель с параллельными кромками. В этой щели, вблизи геометрической точки схождения, периодически возникают перемычки жидкого металла. Характер появления и перемещения которых определяет качество сварного шва.

Установлено наличие взаимосвязи частоты образования перемычек с хладостойкостью и ударной вязкостью СС (Рисунок 3). Показано, что наилучшие результаты испытаний на ударный изгиб СС достигаются в случае сварки с частотой образования перемычек в диапазоне 200-300 Гц. При таком перемещении перемычек происходит очистка шва от окислов. Шов последовательно заполняется металлом перемычек. Сварное соединение получается в максимальной степени свободным от окислов.

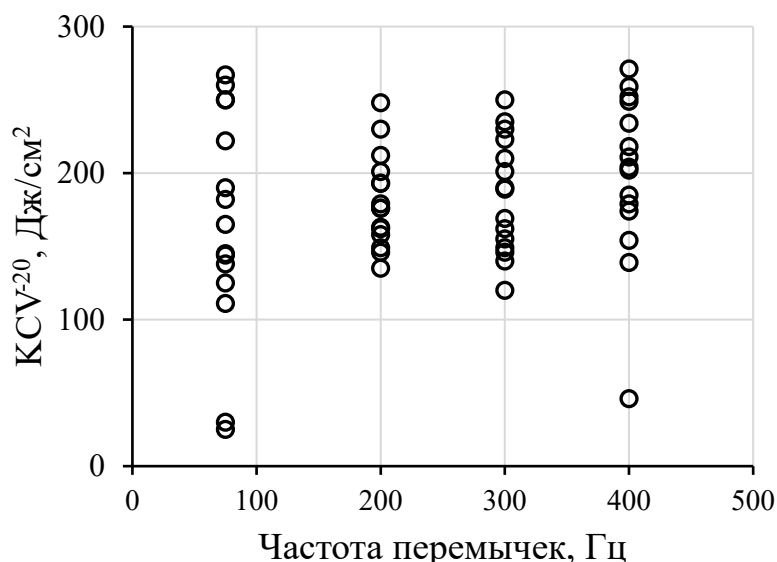


Рисунок 3.

Рассеяние ударной вязкости сварных соединений труб 219×8 мм из стали 05ХГБ в зависимости от частоты образования перемычек

В пятой главе приведены результаты исследования влияния различных технологических параметров на качественные характеристики СС ТВЧ.

Выявлена связь нерегулярности движения перемычек (интервала между ними) с наличием неметаллических включений в сварном соединении. При увеличении интервала между последовательными перемычками в СС появляются короткие участки, на которых не было очищающего действия быстро движущихся перемычек, а заполнение зазора на этих участках происходит за счёт возврата в него окислённого металла с кромок. Появление увеличенных интервалов между перемычками связано с их образованием вдали от точки схождения. На частоту образования отклонений от стандартного интервала между перемычками влияет, прежде всего, величина сварочной мощности, которую целесообразно выбирать и контролировать с учётом наличия и/или отсутствия отклонений. Экспериментально установлено снижение уровня ударной вязкости СС при увеличении временного интервала между образованием перемычек. Проведённые исследования показали, что на участках, на которых интервалы между последовательными перемычками превышают 8 мс, в СС остаются оксиды, которые могут приводить к снижению ударной вязкости СС.

Важным параметром высокочастотной сварки является скорость осадки, которая может быть повышена путём увеличения угла схождения кромок (УСК). При нагреве кромок они окисляются на воздухе. Когда скорость осадки низкая, содержание оксидов в линии сплавления увеличивается, потому что расплавленная сталь частично затвердевает, не перемещаясь полностью в наружный и внутренний грат. Содержание оксидов уменьшается и с уменьшением начальной толщины оксидной плёнки. Испытания поперечных образцов на ударный изгиб после сварки с увеличенным УСК 7° и с УСК 4° показали следующие результаты:

- при угле схождения кромок 7° (мин-макс/среднее) 64-287/197 Дж/см².
- при угле схождения кромок 4° (мин-макс/среднее) 15-355/151 Дж/см².

Преимущества режима сварки с повышенным УСК без образования перемычек связаны с тем, что из-за повышенного УСК и пониженного эффекта близости

разогрев кромок происходит на ограниченной длине. Капли жидкого металла на режиме без образования перемычек появляются на кромках только за 5-10 мм до их смыкания, а при образовании перемычек – 50-70 мм. Снижение времени нагрева может способствовать также уменьшению толщины окисной плёнки на поверхности металла перед сваркой. Положительно на отсутствие оксидов в швах оказывает и повышенная скорость осадки кромок вследствие увеличенного УСК.

Для получения качественного СС необходимо, чтобы весь расплавленный металла был удален в грат при осадке кромок. Чрезмерная величина осадки приводит к сильному искривлению волокон металла, тем самым снижая вязкость и пластичность. Недостаточная осадка может привести к тому, что в СС могут остаться оксидные включения, существенно ухудшающие вязкость. Из результатов испытаний на ударный изгиб поперечных образцов (Рисунок 4) видно, что ударная вязкость СС при осадке $0,7 \times St$ имеет более узкое распределение с минимальными значениями ударной вязкости 177 Дж/см^2 . При осадке $0,25 \times St$ имеются результаты ударной вязкости менее 50 Дж/см^2 .

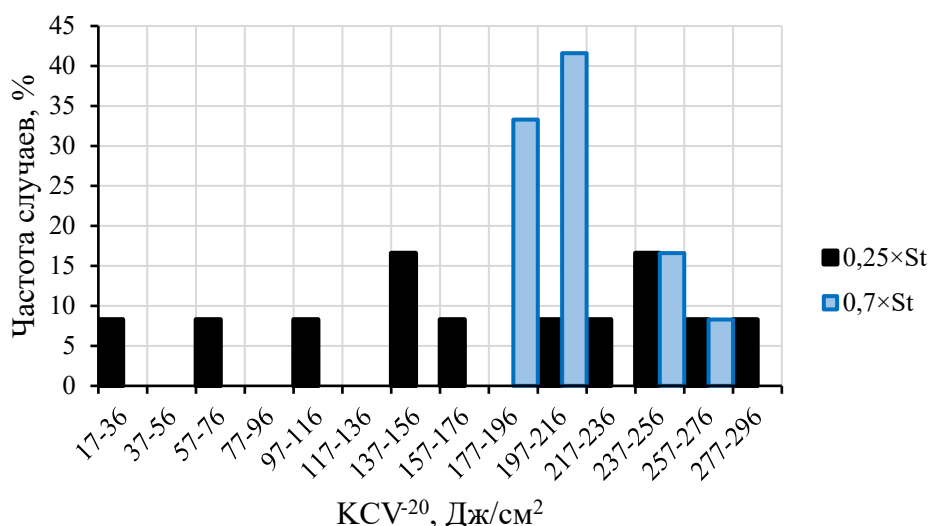


Рисунок 4.

Распределение ударной вязкости KCV^{-20} СС труб, сваренных при различной осадке

Установлена связь углов изгиба волокон с величиной осадки и сварочной мощностью. Полученные результаты позволили оптимизировать величину осадки в зависимости от марок сталей и требований, предъявляемых к СС:

- для низкоуглеродистых марок стали ($C \sim 0,05-0,07\%$) увеличение величины осадки до $0,7 \times St$ позволяет повысить скорость осадки для гарантии удаления жидкого металла и окислов в грат;

- для среднеуглеродистых марок сталей ($C > 0,20\%$) снижение величины осадки до $0,25 \times St$ позволяют уменьшить углы изгиба волокон и исключить растрескивание при нагреве и осадке.

Одним из важных параметров в процессе сварки труб ТВЧ является выбор частоты тока при сварке.

Исходя из результатов испытаний СС на ударный изгиб, сваренных при частотах 220 кГц и 150 кГц (Рисунок 5), видно, что лучшие результаты получены при испытании образцов от труб, сваренных при частоте 220 кГц, из всех испытанных образцов только на одном получено значение 22 Дж/см^2 . Напротив, при испытании

образцов отобранных от СС труб, сваренного при частоте 150 кГц, более 40% значений ударной вязкости ниже 50 Дж/см².

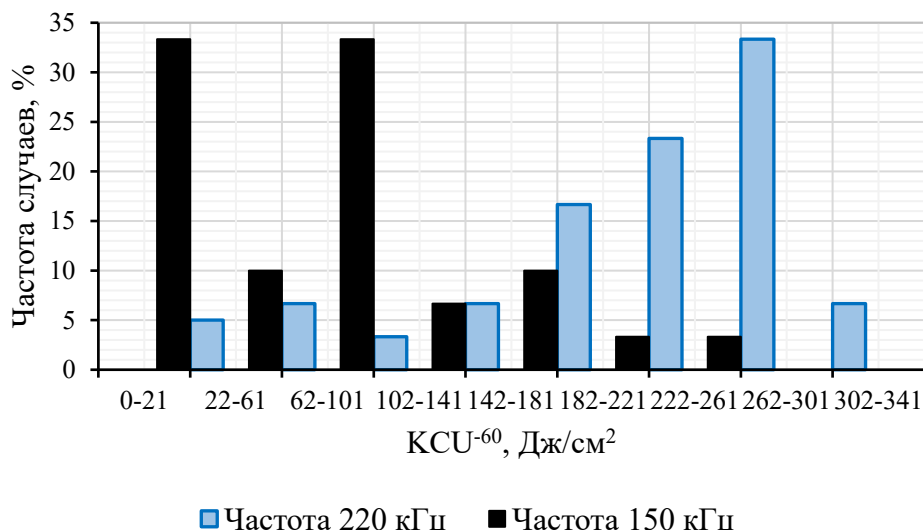


Рисунок 5.

Распределение ударной вязкости КСУ-60 СС, сваренных при частотах 150 кГц и 220 кГц

Если увеличение частоты тока со 150 кГц до 220 кГц благоприятно влияет на удаление оксидных неметаллических включений и результаты испытаний СС на ударный изгиб, то исходя из распределения значений ударной вязкости поперечных образцов отобранных от труб, сваренных при частотах 220 кГц и 280 кГц (Рисунок 6), видно, что, дальнейшее увеличение частоты до 280 кГц не приводит к улучшению результатов испытаний, что связано с получением минимальной толщины оксидной пленки на свариваемых кромках при частоте тока 220 кГц.

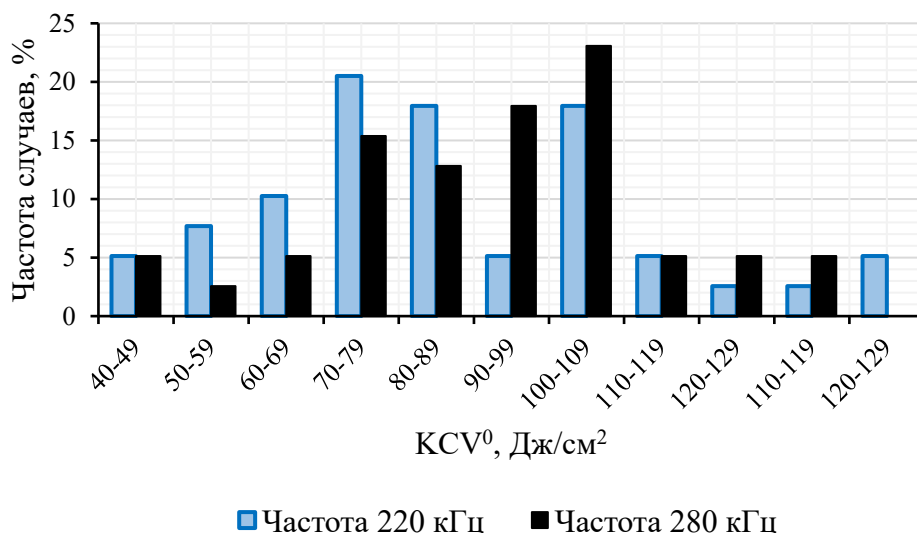


Рисунок 6.

Распределение ударной вязкости KCV⁰ СС, сваренных при частотах 220 кГц и 280 кГц

Улучшение результатов испытаний на ударный изгиб при повышении частоты тока свыше 150 кГц связано с уменьшением глубины прогрева кромок и уменьшением толщины оксидной пленки. Наличие в этом случае более тонкого слоя,

разогретого до пластического состояния металла, способствует увеличению скорости осадки и более интенсивному удалению образующихся при сварке оксидов в процессе осаждения кромок.

СС в процессе сварки приобретает структуру, неблагоприятную для получения удовлетворительных значений ударной вязкости. При проведении ЛТО структура СС становится более равномерной и мелкозернистой, что благоприятно влияет на его свойства. При проведении объёмного отпуска происходит снятие остаточных напряжений, возникших в процессе трубного передела, что также в какой-то степени положительно влияет на ударную вязкость СС, так же при производстве труб может применяться объёмная закалка с отпуском. Оптимальный выбор параметров и последовательности ЛТО и ОТО могут существенным образом повысить вязкость СС при отрицательных температурах.

Проведённые исследования позволили получить следующие результаты:

- С точки зрения повышения ударной вязкости и хладостойкости СС лучшим, из опробованных режимов ТО, является вариант двойной закалки с отпуском СС, первая из которых проводится при ЛТО, вторая при ОТО (Рисунок 7);

- После двойного термического улучшения СС во многих случаях получены высокие значения ударной вязкости во всем исследуемом температурном интервале от 0°C до -70°C. Даже после испытания при отрицательной температуре -70°C наблюдались значения ударной вязкости 107-137 Дж/см². Полученные результаты испытания на ударный изгиб СС сопоставимы с ударной вязкостью образцов от основного металла трубы после ОТО.

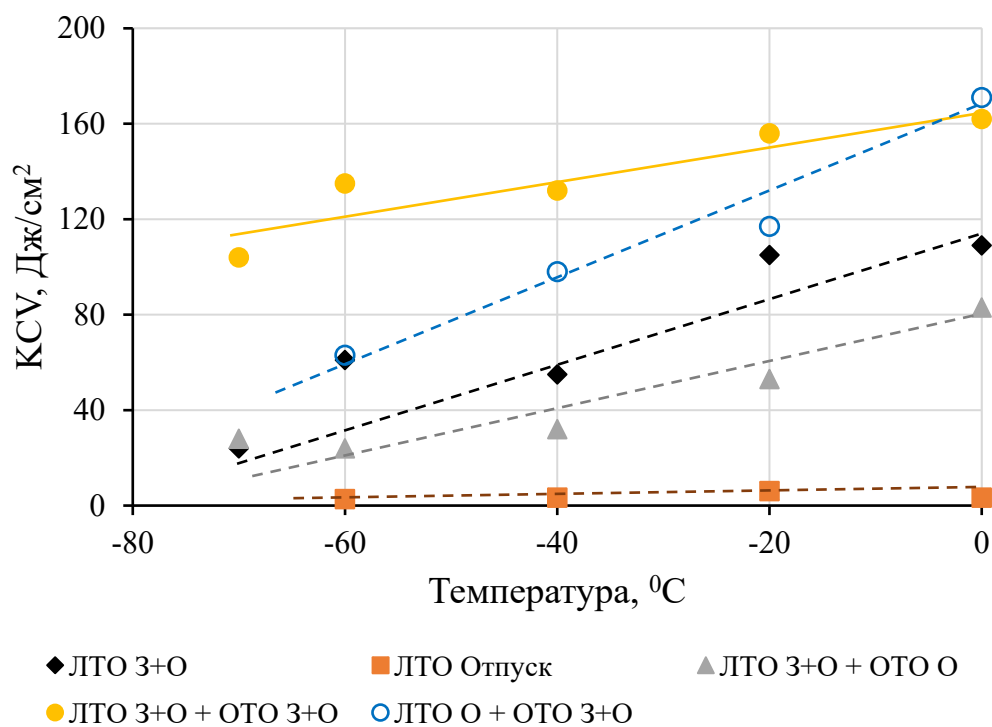


Рисунок 7.

Ударная вязкость СС труб 426×12 мм из стали 20Х1Г при различных параметрах и последовательности ТО

Шестая глава посвящена разработке способа и устройства мониторинга процесса ТВЧ сварки.

При включении сварочного тока достаточной величины кромки вблизи точки схождения начинают оплавляться. При оптимальном нагреве скорости сближения и оплавления кромок должны быть равны. В результате за точкой схождения кромок образуется узкая параллельная щель. В этой щели, вблизи геометрической точки схождения, периодически возникают перемычки жидкого металла. При образовании перемычки сварочный ток замыкается через неё. При сокращении пути тока меняется нагрузка на сварочный генератор. Разработанный способ мониторинга процесса сварки ТВЧ основан на определении моментов возникновения сварочных перемычек посредством выделения дифференцированного сигнала изменения частоты напряжения сварочного генератора и последующей нормализации сигнала.

Выбор сварочной мощности, по разработанному способу, заключается в получении оптимальной частоты образования перемычек, далее мощность регулируется таким образом, чтобы исключить появление интервалов между перемычками превышающих 8 мс. По данному способу так же ведётся мониторинг процесса сварки без образования перемычек (с углом 7°), контроль в этом случае осуществляется за их отсутствием.

В **седьмой главе** сформулирована концепция выбора режима сварки ТВЧ, описаны области применения новых технологий сварки, термообработки и результаты внедрения данных технологий в АО «ВМЗ».

В результате многочисленных исследований установлены два способа сварки труб ТВЧ улучшающие вязкость СС, которые можно использовать в зависимости от состава технологического оборудования и сортамента изготавливаемых труб:

- очистка сварного соединения от оксидных включений путём управления закономерностями движения перемычек (частота, интервалы между перемычками);
- удаление оксидных включений при увеличении УСК за счёт увеличения скорости осадки, уменьшении времени нагрева и соответствующее снижению толщины окисной плёнки.

Начальное оплавление кромок зависит не только от УСК (эффект близости), но и от расстояния между источником подвода ТВЧ до точки схождения. В зависимости от диаметра свариваемых труб и состава технологического оборудования это расстояние составляет от 150 мм (для труб диаметром 60-219 мм) до 330 мм (для труб диаметром 245-530 мм). Исследования, проведённые на оборудовании с расстоянием от точки схождения до источника подвода ТВЧ равным 330 мм, позволили увеличить угол до 7° , однако, из-за большей длины нагрева получить начальное оплавление кромок на ограниченной длине (5-10 мм) непосредственно перед схождением кромок оказалось практически невозможно. Таким образом, при использовании источников подвода тока к кромкам на расстоянии около 300-330 мм от точки их схождения теряется основное преимущество сварки труб с УСК 7° – снижение времени нагрева и уменьшение окисленного металла перед сваркой, тем не менее, за счёт высокой скорости осадки происходит эффективное удаление оксидных включений. На основе проведённых исследований, для удаления оксидных включений из СС, с учётом состава технологического оборудования и сортамента свариваемых труб, разработана концепция выбора режима сварки (Рисунок 8):



Рисунок 8.

Концепция выбора режима сварки ТВЧ

В период 2019-2024 гг. с использованием разработок произведено и отгружено потребителям свыше 100 тыс. тонн:

- электросварных обсадных труб группы прочности Дс, повышенных групп прочности до Р110 в хладостойком исполнении (KCV^{-40} не менее 50 Дж/см²), до этого для данного назначения применялись только бесшовные трубы.

- электросварных нефтегазопроводных труб классов прочности К52-К60 в хладостойком исполнении (KCV^{-40} не менее 39 Дж/см²).

Экономический эффект составил 150 млн. руб.

Основные выводы

1. Проведён обширный комплекс исследований процессов при сварке труб ТВЧ, установлены основные микроструктурные механизмы, определяющие уровень вязкости и хладостойкости СС труб. Установлены детали процессов, проходящие при высокочастотной сварке, особенности и закономерности формирования СС. Установлено влияние различных технологических параметров на вязкость СС. Разработана и внедрена система мониторинга процесса сварки ТВЧ.

2. Показано, что в результате усиления текстурного компонента, по сравнению с осевой зоной основного металла, в районе линии сплавления сварных соединений

посредине толщины стенки труб зафиксирован рост с 16 до 28 % объемной доли зерен α -фазы, у которых кристаллографические плоскости $\{001\}$ с разбросом 20° ориентированы параллельно продольному направлению, т.е. параллельно поверхности разрушения испытуемых на ударный изгиб поперечных образцов.

3. Установлено, что по сравнению с ОМ в области ЛС, наблюдается уменьшение сопротивления металла хрупкому разрушению, снижение средних, максимальных значений ударной вязкости и увеличение рассеяния значений ударной вязкости при всех температурах испытаний в интервале от -80°C до $+20^\circ\text{C}$. Повышенное рассеяние значений ударной вязкости в металле СС ТВЧ обусловлено большим числом с степенью влияния дополнительных охрупчивающих факторов, в сравнении с ОМ.

4. Рассеяние ударной вязкости резко снижается при удалении на 1 мм и более от ЛС. Установлено, что если ударная вязкость СС существенно ниже ударной вязкости ОМ труб, то максимальный разброс значений имеет место при совпадении оси надреза с ЛС. При расположении надреза относительно СС более чем на 1 мм результаты испытаний становятся идентичными с результатами испытаний ОМ труб, что обусловлено снижением влияния НВ, текстуры, и размера зерна.

5. Установлены наиболее сильные факторы, охрупчивающие СС:

- Сварочные окислы являются наиболее сильным охрупчивающим фактором, определяющим качество СС;
- Степень охрупчивания линзовидных неметаллических включений зависит от окружающей микроструктуры;
- Неоднородное распределение составляющих в микроструктуре, размер, содержание неметаллических включений и формирование неблагоприятной микротекстуры.

6. Показано, что ТЦ сварки из низкоуглеродистой стали не ухудшает ударную вязкость, а деформационное воздействие и изгиб волокон металла, характерный для сварки ТВЧ – приводит к рассеянию результатов испытаний на ударный изгиб СС труб.

7. Получен ряд новых результатов, характеризующих особенности и закономерности формирования СС труб ТВЧ, в том числе:

- Установлено наличие взаимосвязи частоты образования перемычек с типом сварочного процесса, нерегулярности движения перемычек с наличием неметаллических включений, увеличенного интервала между перемычками со снижением уровня ударной вязкости;
- Установлены способы сварки труб, улучшающие СС соединений за счет удаления оксидных неметаллических включений;
- Показано, что наилучшие результаты испытаний на ударный изгиб СС достигаются в случае сварки с частотой образования перемычек 200-300 Гц.
- Установлено, что сварка труб с УСК 7° позволяет практически полностью устранить сварочные оксидные неметаллические включения в СС.

8. Увеличение частоты тока со 150 кГц до 220 кГц способствует улучшению результатов испытаний на ударный изгиб, что связано с уменьшением глубины прогрева кромок. Наличие в этом случае более тонкого слоя, разогретого до пластического состояния металла, способствует более интенсивному удалению

образующихся при сварке окислов в процессе осаживания кромок. Дальнейшее увеличение частоты не приводит к изменению результатов испытаний.

9. Показано улучшение ударной вязкости СС при увеличении осадки за счет гарантии удаления жидкого металла и окислов в грат. Снижение осадки приводит к исключению растрескивания СС по линиям изгиба волокон за счет снижения углов изгиба.

10. Установлены два способа сварки труб ТВЧ улучшающие качество СС, которые можно использовать в зависимости от состава технологического оборудования и сортамента изготавливаемых труб:

- отчистка СС от оксидных включений путём управления закономерностями движения перемычек (частота, интервалы между перемычками);
- удаление оксидных включений при увеличении угла схождения за счёт увеличения скорости осадки, уменьшении времени нагрева и соответствующее снижению толщины окисной плёнки.

11. Разработана концепция выбора сварочного режима, улучшающие качество СС, которые можно использовать в зависимости от состава технологического оборудования и сортамента изготавливаемых труб:

- При расположении источника подвода ТВЧ не более 300 мм от точки схождения - сварка труб с УСК 7⁰ на режиме без образования перемычек;
- При расположении источника подвода ТВЧ более 300 мм от точки схождения - сварка труб с УСК 4⁰ на режиме с образованием перемычек;

12. Показано, что после двойного термического улучшения СС, за счет формирования отпущенного сорбитоподобного бейнита, низкой и равномерной твёрдости, получены высокие значения ударной вязкости в температурном интервале от 0⁰С до -70⁰С. Полученные результаты испытаний на ударный изгиб СС сопоставимы с ударной вязкостью ОМ трубы после ОТО.

13. Разработан способ и система мониторинга процессом высокочастотной сварки труб, включающие определение частоты образования перемычек, образовавшихся на задаваемой длине СС и контроль за величиной интервалов между моментами образования сварочных перемычек.

14. В трубоэлектросварочных цехах АО «ВМЗ» освоена промышленная технология производства труб диаметром 60-530 мм с толщиной стенки 5,0-12,7 мм обеспечивающих повышенные требования к хладостойкости СС. Объем произведенных и отгруженных потребителю труб составил более 100 тыс. тонн. Актами внедрения НИОКР и освоения НВП установлена способность технологий сварки и термообработки обеспечивать требования к вязкостным свойствам СС.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

1. Суслик М.Е., Сорокин А.Е. Совершенствование производства электросварных труб из коррозионно – стойких сталей // Сталь. 2006. №9. С. 79-82 (0,25 п.л./0,2 п.л.).

2. Ефимов И.В., Степанов П.П., Сорокин А.Е. Исследование процесса высокочастотной сварки труб с применением скоростной съемки // Проблемы чёрной металлургии и материаловедения. 2020. №1. С. 12-20 (1,12 п.л./0,3 п.л.).

3. Влияние технологических параметров сварки давлением с оплавлением после нагрева токами высокой частоты на микроструктуру и хладостойкость сварного

соединения стальных труб малого и среднего диаметра / Ефимов И.В. [и др.] // *Металлург*. 2023. №2. С. 76-85 (1,25 п.л./0,25 п.л.).

4. Охрупчивающие факторы при разрушении сварных соединений ТВЧ трубы из низкоуглеродистой низколегированной стали по результатам испытаний на ударный изгиб / Степанов П.П. [и др.] // *Металлург*. 2024. № 11. С.31-39 (1,4 п.л./0,25 п.л.).

5. Технологические особенности сварки токами высокой частоты труб малого и среднего диаметра / Сорокин А.Е. [и др.] // *Сварка и диагностика*. 2025. №1. С. 51-57 (1,1 п.л./0,7 п.л.).

6. Оптимизация режима высокочастотной сварки труб с использованием скоростной видеосъемки / Белов Е.В. [и др.] // *Развитие технологий производства стали, проката и труб на Выксунской производственной площадке*. М.: *Металлургиздат*, 2016. С. 306-314 (0,5 п.л./0,2 п.л.).

7. Сорокин А.Е., Степанов П.П., Эфрон Л.И. Исследование процесса сварки труб токами высокой частоты и разработка способа управления им на заводе ОМК в Выксе // *Сборник трудов конференции «Трубы-2023»*. Челябинск. 13-15 сентября 2023. С. 176-182 (0,3 п.л./0,2 п.л.).

8. Солдатов Е.А. Сорокин А.Е. Разработка и внедрение технологии производства проката марки стали 20Х1Г, а также обсадных и насосно – компрессорных труб из него в хладостойком исполнении в условиях Выксунского завода ОМК // *Сборник трудов конференции «XIV Конгресс прокатчиков»*. Череповец. 16-18 апреля 2024 г. С. 98-104 (0,3 п.л./0,15 п.л.).

9. Сорокин А.Е. Управление процессом сварки труб токами высокой частоты, структурой и свойствами сварного соединения труб малого и среднего диаметра на заводе ОМК в Выксе // *Сборник тезисов I Всероссийской НТК им. ак. Н.П. Алешина (с международным участием)*, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана. 11-13 ноября 2024 г. С. 65-68 (0,2 п.л./0,2 п.л.).

10. Улучшение технологии локальной термообработки сварных ТВЧ-соединений труб по режиму высокотемпературного отпуска / Жарков С.В. [и др.] // *Сварка и диагностика*. 2025. №5. С 54-58 (1,1 п.л./0,4 п.л.).

11. Патент №2722957 Российская Федерация, МПК В23К 13/02, В23К 101/06, В21С 37/08. Способ управления процессом высокочастотной сварки труб и устройство для его осуществления : №2019120312 : заявл. 27.06.2019; опубл. 05.06.2020. Бюл. 16 / Степанов П.П. [и др.].

12. Патент №2750921 Российская Федерация, МПК В23К 13/02, В23К 101/06, В21С 37/08. Способ управления процессом высокочастотной сварки : №2020139413 : заявл. 30.11.2020; опубл. 06.07.2021. Бюл. 19 / Степанов П.П. [и др.].

13. Патент №2682984 Российская Федерация, МПК С21D 8/10, С22С 38/00. Способ производства трубы с низким отношением предела текучести к пределу прочности : № 2018108645 : заявл. 27.03.2018; опубл. 25.03.2019. Бюл. 9 / Ткачук М.А. [и др.].