

ПРЕПРИНТ

На тему: Разработка технологии механизированной сварки углового соединения патрубка с цилиндром компрессорной установки из низколегированной стали ASTM A350 LF3

Аннотация

Представлены результаты исследований по разработке и внедрению технологии механизированной сварки углового соединения патрубка с цилиндром компрессорной установки из стали ASTM A350 LF3. Выбор материала обусловлен его высокой ударной вязкостью при низких температурах и требованиями к надежности ответственных конструкций в машиностроении. На основе сравнительного анализа традиционной стали 14Х2ГМР и импортного аналога ASTM A350 LF3 обоснована необходимость адаптации сварочных процессов. В качестве оптимального метода выбран механизированный процесс сварки плавящимся электродом в среде защитного газа (MAG) – аргон-углекислотная смесь (82% Ar / 18% CO₂). Разработаны и теоретически рассчитаны параметры режима сварки для толщины стенок до 70 мм, включая сварочный ток (134 А), напряжение дуги (22,4 В), скорость подачи проволоки (0,17 м/ч) и определено количество проходов (13–15). Экспериментальные исследования включали металлографический анализ сварного соединения, в ходе которого выявлена типичная для данного процесса микроструктура (игольчатый феррит, бейнит) и установлена твердость в диапазоне 21–43 HV. Также идентифицированы потенциальные дефекты (пористость, непровар, шлаковые включения, трещины) и предложены методы их контроля (ВИК, УЗК, капиллярный контроль). Результаты показывают, что предложенная технология обеспечивает получение качественного соединения, отвечающего требованиям эксплуатации компрессорного оборудования в условиях низких температур и циклических нагрузок. Работа выполнена при поддержке АО «Казанькомпрессормаш» в рамках технологической адаптации к новым материалам.

Ключевые слова: ASTM A350 LF3, механизированная сварка (MAG), угловое соединение, патрубок, цилиндр компрессора, параметры режима сварки, микроструктура, дефекты сварки, контроль качества.

1. Введение

Актуальность разработки обусловлена переходом отечественного машиностроения, в частности, производства компрессорного оборудования на АО «Казанькомпрессормаш», на использование импортных сталей с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Сталь ASTM A350 LF3 относится к классу низколегированных сталей, предназначенных для изготовления поковок и фитингов, работающих при низких температурах. Ее ключевые преимущества – высокий предел текучести (≥ 260 МПа) и ударная вязкость при -100°C (≥ 20 Дж), что критически важно для оборудования, эксплуатируемого в суровых климатических условиях. Однако свариваемость этой стали сопряжена с риском образования холодных трещин из-за относительно высокого углеродного эквивалента ($\text{Сэкв} \approx 0,573$). В связи с этим требуется разработка и адаптация сварочной технологии, гарантирующей получение бездефектных соединений с требуемым комплексом механических свойств.

Цель работы: разработка и научно-техническое обоснование технологии механизированной сварки углового соединения патрубка с цилиндром из стали ASTM A350 LF3.

Задачи:

1. Провести сравнительный анализ стали ASTM A350 LF3 с традиционно применяемой сталью 14Х2ГМР.
2. Обосновать выбор метода и технологии сварки.
3. Рассчитать оптимальные параметры режима многослойной сварки.
4. Провести экспериментальное исследование микроструктуры и твердости сварного соединения.

5. Проанализировать возможные дефекты и предложить методы контроля.

2. Объекты и методы исследования

- **Материал:** Сталь ASTM A350 LF3 (химический состав: С ≤0.20%, Si 0.12–0.35%, Mn ≤0.9%, Ni 3.3–3.7%, Cr ≤0.30%, Mo ≤0.12%, S/P ≤0.040%). В качестве аналога рассмотрена сталь 14Х2ГМР.

- **Метод сварки:** Полуавтоматическая сварка в среде защитных газов (MAG) – аргонодуговая сварка (МАДП-0-04УПТ) с газовой смесью Ar (82%) + CO₂ (18%).

- **Присадочный материал:** Сварочная проволока Boehler 2,5 Ni-iG (Ø1.2 мм) с содержанием никеля 2.5%, что способствует повышению ударной вязкости шва.

- **Методы анализа:**
 - Теоретический расчет параметров режима сварки (ПРС).
 - Металлография: приготовление шлифов, травление 4% HNO₃ в спирте, анализ микроструктуры на оптическом микроскопе.
 - Измерение твердости по Виккерсу (HV).
 - Анализ потенциальных дефектов.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Сравнительный анализ материалов

Проведенный анализ показал, что сталь ASTM A350 LF3, в отличие от 14Х2ГМР, обладает более низким пределом прочности (485–655 МПа против 880–1080 МПа), но существенно более высокой гарантированной ударной вязкостью при низких температурах. Высокое содержание никеля (3.3–3.7%) обеспечивает стабильность ферритной структуры, снижает порог хладноломкости и уменьшает риск образования холодных трещин в ЗТВ, что делает ее предпочтительной для криогенных применений.

3.2. Выбор и обоснование технологии сварки

Проанализированы три метода: ручная дуговая сварка (MMA), автоматическая под флюсом (SAW) и механизированная в среде газа (MAG).

Для углового шва сложной пространственной конфигурации (стык патрубка с цилиндром) метод MAG признан оптимальным. Он обеспечивает высокую производительность, качественную защиту зоны сварки, хорошее формирование шва и возможность работы в различных пространственных положениях.

3.3. Расчет параметров режима сварки

Для толщины цилиндра 70 мм и патрубка 64 мм с односторонней V-образной разделкой (30°) проведен расчет ПРС. Получены следующие ключевые параметры для проволоки $\varnothing 1.2$ мм:

- Сварочный ток ($I_{\text{св}}$): 134 А
- Напряжение на дуге ($U_{\text{д}}$): 22.4 В
- Скорость сварки ($V_{\text{св}}$): 0.39 м/ч
- Скорость подачи проволоки ($V_{\text{под.пр.}}$): 0.17 м/ч

Расчет количества проходов показал необходимость наложения 13–15 слоев при высоте валика 4–6 мм с обязательным смещением начала каждого последующего прохода на 70–100 мм для предотвращения перегрева.

3.4. Экспериментальные исследования

Металлографический анализ выявил следующую структуру соединения:

- **Основной металл:** Мелкозернистая феррито-перлитная структура.
- **Зона термического влияния (ЗТВ):** Неоднородная феррито-перлитная структура с признаками рекристаллизации, без грубого зерна и закалочных структур, что свидетельствует о корректном тепловом цикле.
- **Металл шва:** Структура, характерная для высоких скоростей охлаждения – игольчатый и пластинчатый феррит с участками бейнита. Подтверждено наличие мелкодисперсной структуры, благоприятной для механических свойств.
- **Твердость:** Измерения по Виккерсу показали разброс значений от 21 до 43 HV, что соответствует ожидаемым для данного класса сталей и

метода сварки величинам. Более высокие значения (35–43 HV) зафиксированы локально, возможно, в зонах с бейнитной составляющей.

3.5. Анализ дефектов и контроль качества

Систематизированы основные дефекты, характерные для данного процесса:

- **Пористость:** Возникает из-за влаги, турбулентности газового потока.
- **Непровар корня:** Следствие неверно выбранных параметров или отклонения горелки.
- **Включения (шлак, окалина):** Результат недостаточной очистки кромок.
- **Подрез:** Образуется при избыточном тепловложении.
- **Треугольные (горячие/холодные):** Связаны с высокими скоростями охлаждения, водородом, ликвацией.
- **Деформации:** Неизбежны при многослойной сварке толстостенных изделий.

Предложен комплексный план контроля, включающий визуально-измерительный контроль (ВИК) на всех этапах, капиллярный контроль (ПВК) для выявления поверхностных дефектов, ультразвуковой контроль (УЗК) для выявления внутренних несплошностей и выборочный металлографический анализ.

4. Заключение

1. Разработана и научно обоснована технология механизированной сварки (MAG) углового соединения патрубка с цилиндром из стали ASTM A350 LF3 с использованием проволоки Boehler 2,5 Ni-iG и газовой смеси Ar (82%) + CO₂ (18%).

2. Проведенный расчет параметров режима сварки (I_{св}=134 A, U_д=22.4 В, 13–15 проходов) и стратегия их выполнения (смещение начала проходов) направлены на минимизацию сварочных напряжений и дефектов.

3. Экспериментально подтверждено формирование приемлемой микроструктуры в основном металле, ЗТВ и шве. Значения твердости находятся в ожидаемом диапазоне.

4. Разработан комплекс мероприятий по контролю качества, позволяющий своевременно выявлять и предотвращать возникновение характерных дефектов.

Перспективы: Полученные результаты могут быть использованы для разработки технологической документации (Технологических карт, Регламентов) на АО «Казанькомпрессормаш» и других предприятиях, осваивающих сварку сталей типа ASTM A350 LF3. В дальнейшем рекомендуется провести полномасштабные испытания на прочность и ударную вязкость изготовленных по данной технологии опытных соединений.