

М 175010

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

**НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ**

**Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана**

ЛУЧКИН Р. С.

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ СВОЙСТВ
И КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ СВАРНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВА ЦИРКОНИЯ С 2,5% НИОБИЯ**

(05.167 — «Машины и технология сварочного производства»)

Диссертация написана на русском языке

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена
Трудового Красного Знамени высшем техническом училище
имени Н. Э. Баумана.

Научный руководитель —
кандидат технических наук, доцент Стéклов О. И.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Фролов В. В.,
кандидат технических наук, доцент Шубин Ф. В.

Ведущее предприятие у́казано в решении Ученого Совета.

Автореферат разослан « » 1972 г.

Защита диссертации состоится « 16 » *ноябр-я* 1972 г.

на заседании

МВТУ им. Н.
уманская, д.

С диссер

Ваши от
ные печать

Ученый

2-я Ба-

МВТУ.

аверен-
су.

4175010



1175010

Лучкин Р.С. Исследование

ВВЕДЕНИЕ

Развитие реакторостроения выдвигает проблему создания новых конструкционных материалов. Специфические условия работы узлов реакторов и наблюдающаяся тенденция к повышению мощности электростанций предъявляют особые требования к применяемым конструкционным материалам, в том числе:

- а) жаропрочность при высоких напряжениях, возникающих вследствие высоких скоростей подвода и отвода тепла;
- б) сопротивляемость механическим повреждениям;
- в) высокая коррозионная стойкость и др.

В настоящее время наиболее полно этим требованиям отвечают сплавы на основе циркония, в том числе сплав $Zr-2,5\%Nb$, разработанный в СССР.

При сооружении узлов реакторов одним из основных технологических процессов является сварка. Эксплуатация сварных узлов из сплава $Zr-2,5\%Nb$ в воде и паро-водяной среде выявила более низкую коррозионную стойкость определенных зон сварного соединения по сравнению с основным металлом. В связи с этим дальнейшее повышение энергетических параметров электростанций становится затруднительным. Очевидно, что преимущественная коррозия сварных соединений сплава определяется комплексом показателей неоднородности свойств, их влиянием на кинетику процесса разрушения.

Многообразие факторов, определяющих работоспособность сварных соединений в активной среде, ограниченное количество данных о степени их воздействия на свойства соединений и недостаточная изученность поведения сварных узлов из сплава $Zr-2,5\%Nb$ в условиях эксплуатации затрудняют обоснованный выбор оптимальных технологических решений.

В связи с этим возникла необходимость изучения свойств сварных соединений сплава $Zr-2,5\%Nb$, их коррозионного поведения, изучения влияния технологических факторов на свойства и коррозионное поведение сварного соединения, определения влияния и выбора оптимальной послесварочной обработки для улучшения свойств и повышения коррозионной стойкости.

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

МГТУ
им. Н. Э. Баумана
Библиотека

Глава I. Состояние вопроса, цели и задачи исследования

В обзоре, сделанном в главе, показано, что свойства сплавов системы $Zr-Nb$, их коррозионное поведение и влияние различных факторов на стойкость сплавов при эксплуатации рассмотрены в работах отечественных (Амаев А. Д., Амбарцумян Р. С., Емельянов В. С., Герасимов В. В., Парфенов Б. Г. и др.) и зарубежных (Миллер Г. Л., Richter H., Tverberg I. C., Spindler H., Marshall R. и др.) исследователей. В частности, показано, что свойства сплавов системы $Zr-Nb$ весьма чувствительны к видам и режимам технологической обработки и скорости охлаждения после нагрева в области высоких температур, влияющей на структурный и фазовый состав сплавов, их механические и коррозионные свойства.

Характерной особенностью сплава $Zr-2,5\% Nb$ (как и всех остальных сплавов циркония) является повышенная способность к поглощению газов, особенно кислорода и водорода, с образованием окислов и гидридов, приводящая к охрупчиванию и резкому снижению коррозионной стойкости сплава.

Повышенная активность сплавов по отношению к атмосферным газам предъявляет требования надежной защиты зон металла, нагреваемых до температур выше $350^{\circ}C$ (сварка с местной защитой, в камерах с контролируемой атмосферой, в вакууме). Для сварных соединений сплавов циркония характерны высокие пластические свойства и отсутствие дефектов формирования шва при соблюдении технологических требований. Полиморфные превращения при сварке способствуют появлению метастабильных фаз с различным содержанием легирующего элемента; при больших скоростях охлаждения возможно возникновение закалочных структур мартенситного типа; явления рекристаллизации металла определенных зон соединения вызывают усиленный рост зерна. Эти факторы, характеризующие структурную и химическую неоднородность, изменяют коррозионные и механические свойства различных зон сварных соединений сплавов циркония.

Малые величины модуля упругости E и коэффициента линейного расширения α для сплавов циркония определяют низкие значения остаточных сварочных напряжений (меньше $\sigma_{0,2}$). Однако, данные о механических свойствах сварных соединений и о роли собственных упруго-пластических деформаций

ций при эксплуатации сварных узлов, изготовленных из сплава $Zr-2,5\% Nb$, в литературных источниках отсутствуют.

Ограниченное количество исследований, посвященных вопросам коррозионного поведения сварных соединений сплава, не позволяет определить механизм коррозии, оценить роль показателей неоднородности свойств при работе соединения в активной среде.

С целью определения причин преимущественной коррозии сварных соединений по сравнению с основным металлом и разработки методов повышения стойкости соединений при эксплуатации в активной среде были сформулированы следующие задачи:

1. Разработка методики исследований, позволяющей выявить причины коррозионного разрушения сварных соединений сплава.

2. Изучение величины и характера распределения показателей неоднородности свойств сварных соединений сплава.

3. Для объяснения причин коррозии исследование влияния отдельных показателей неоднородности свойств на коррозионную стойкость сварных соединений с помощью испытаний образцов, имитирующих величину этих показателей и их определенные сочетания.

4. Исследование влияния различных технологических факторов (способов и режимов сварки, термической обработки и др.) на свойства сварных соединений.

5. Разработка мероприятий, направленных на повышение стойкости сварных соединений, работающих в условиях воздействия агрессивных сред, высоких температур и давлений.

Глава II. Методика проведения исследований

Исследование свойств и оценка влияния свойств на работоспособность сварных соединений сплава $Zr-2,5\% Nb$ в эксплуатационных условиях методологически разделяются на три этапа:

1. Исследование сварного соединения как сложной гетерогенной системы. Такой подход позволит оценить величину и характер распределения отдельных показателей неоднородности свойств (структурная и химическая макро- и микронеоднородность, неравномерное распределение остаточных упругих и пластических деформаций в сварном соединении, неоднородность механических свойств и др.), определяющих коррозионное поведение соединения исследуемого сплава.

2. Имитация отдельных видов неоднородности свойств сварного соединения и их сочетаний, проведение коррозион-

ных испытаний образцов-имитаторов. Цель этапа — оценка влияния различных видов и сочетаний неоднородности свойств на коррозионное поведение соединения с целью выявления факторов, являющихся решающими для работы сварных узлов в коррозионных условиях, и последующего активного воздействия на них технологическими методами.

3. Проведение натурных коррозионных испытаний сварных образцов, соединений и узлов. Этот этап является синтезом результатов второго этапа.

Методика изучения неоднородности свойств. Определение термических циклов сварки производили экспериментальным путем с помощью осциллографической записи показаний термомпар по общепринятой методике. Изучение величины и характера распределения температур производилось на трубчатых образцах диаметром 88×4 мм. Рабочий конец термомпары зачеканивали на глубину 2 мм на внешней поверхности образца и экранировали циркониевой фольгой.

Для определения структурной неоднородности свойств сварного соединения сплава $Zr - 2,5\% Nb$ наряду с методами металлографического и рентгеноструктурного анализа был использован метод термоэлектрических потенциалов (ТЭП). Этот метод основан на явлении возникновения разности потенциалов между горячим и холодным контактами из разнородных материалов, вследствие термодиффузии носителей зарядов. Теоретический анализ происходящих при этом явлении показал, что величина ТЭП определяется удельным сопротивлением для электронов с энергией, равной фермиевской и зависит от величины различных составляющих полного сопротивления. Для правильного применения метода ТЭП в работе показано и учтено влияние различных факторов на чувствительность и точность метода. Были проведены металлографические исследования металла различных зон соединений сплава $Zr - 2,5\% Nb$, отвечающих характерным точкам кривых ТЭП и обнаружена непосредственная связь типа структуры и характера распределения структурных составляющих со значениями ТЭП. Созданные опытные приборы для макро- и микроскопического определения величины ТЭП в сварных соединениях позволили в дальнейшем просто и надежно судить о характере неоднородности в любой зоне металла.

Стандартное определение твердости производилось на приборе Виккерса и микротвердомере ПМТ-3.

Исследование упруго-пластического состояния производилось на трубчатых образцах диаметром 88×4 мм и длиной 200 мм с кольцевым швом и на пластинах размером

200×150×4 мм с продольным швом. Упругие и пластические деформации определялись методом разрезки с использованием механического деформометра и методики, разработанных в МВТУ им. Баумана (база измерения 10 мм) и с применением проволочных тензодатчиков с базой измерения 5 мм нулевым методом. Остаточные сварочные напряжения рассчитывали по известным уравнениям теории упругости.

Неоднородность распределения механических свойств в различных зонах сварных соединений исследовали путем испытаний на изгиб (по методике МВТУ им. Баумана) и на растяжение (ГОСТ 1497-61). Для определения прочностных и пластических характеристик при растяжении металла отдельных зон соединения применяли также специальные образцы с выточкой радиусом 40 мм.

Исследование электрохимической неоднородности металла различных зон сварных соединений сплава проводилось путем определения установившихся значений электродных потенциалов.

Методика имитации различных показателей неоднородности свойств и их сочетаний. Определенные виды неоднородности свойств воспроизводились в металле образцов-имитаторов на специально созданной установке. Были созданы и испытаны следующие типы образцов-имитаторов (табл.):

Таблица

Программа имитации различных показателей неоднородности свойств в образцах из основного металла

Характеристика термического цикла			Величина задаваемой пластической деформации, %	Величина задаваемых растягивающих напряжений, кг/мм ²	Сочетание различных видов неоднородности свойств
максимальная температура нагрева, °C	диапазон скоростей нагрева, °C/сек	диапазон скоростей охлаждения, °C/сек			
500	2—120	0,5—1000	0,5	10	Комбинированные образцы
600			1,0		
750			2,0		
850			3,0	15	
1000—1200			5,0	25	

1) образцы, отражающие структурную неоднородность сварного соединения в соответствии с термическими циклами

различных зон соединения; 2) образцы с заданной, определенной степенью деформации, близкой к реальным условиям сварки; 3) образцы с заданной величиной растягивающих напряжений; 4) комбинированные образцы, имеющие: а) структурную неоднородность и заданную величину деформации; б) структурную неоднородность и растягивающие напряжения; в) заданную величину деформации и растягивающие напряжения; г) сочетания структурной неоднородности, деформаций и растягивающих напряжений.

Определенная величина деформаций задавалась путем гидравлического растяжения образца до значений, определяемых по предварительно снятым на специальной установке диаграммам растяжения. Уровень задаваемых деформаций фиксировали по показаниям индикаторных головок часового типа, входящих в систему экстензомера установки. Характер задаваемой структурной неоднородности определяли на основании термических циклов сварки и металлографического исследования металла различных зон соединения. Структурная неоднородность имитировалась путем электроконтактного нагрева образцов от сварочного трансформатора. Сочетания структурной неоднородности и задаваемой деформации воспроизводились на установке путем нагрева образцов по заданному термическому циклу и последующего растяжения в области высоких температур. Напряженное состояние в металле образцов-имитаторов создавали путем их изгиба при коррозионных испытаниях.

Методика коррозионных испытаний. Коррозионные испытания сварных образцов сплава $Zr - 2,5\% Nb$ проводили в автоклаве в деаэрированной воде при температуре $300^{\circ}C$ и давлении 88 *ати*. Скорость коррозии образцов определяли по привесу. Испытания образцов-имитаторов проводили в специальном стенде в динамических условиях (среда — деаэрированная, температура — $285^{\circ}C$ и давление 88 *ати*). Коррозионную стойкость образцов-имитаторов характеризовали качественно по внешнему виду и с использованием количественной оценки — путем определения толщины окисной пленки на металлографическом микроскопе и по изменению показателей механических свойств металла образцов при растяжении.

Глава III. Анализ неоднородности свойств сварных соединений сплава и их влияния на коррозионную стойкость

Разработанная методика исследований позволила выявить величину и характер распределения показателей неоднородности свойств сварных соединений сплава $Zr - 2,5\% Nb$.

В качестве основного технологического процесса получения соединения была использована электронно-лучевая сварка в вакууме (ЭЛС). Сварку производили за три прохода → сварку корня шва и заполнение разделки присадочной проволокой за два прохода. Режим ЭЛС следующий: рабочее напряжение при сварке корня шва — 19 кВ и при наплавке — 20 кВ; сварочный ток при проплавлении корня шва — 50 мА и при наплавке — 60—65 мА; скорость сварки равнялась 15 м/час при заварке корня шва и 10—12 м/час при заполнении разделки; скорость подачи присадочной проволоки составляла 40 м/час; остаточное давление газов $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.

В случае сварки такого структурно-чувствительного материала, как сплав Zr — 2,5% Nb, особенно важно знать характеристики термического цикла. Расшифровка осциллограмм термических циклов позволила выявить следующее. В зоне термического влияния наблюдается значительный градиент максимальных температур. При сварке корня шва сплав находился в зоне $\alpha \rightleftharpoons \beta$ -превращений сравнительно недолго — 7 сек., длительность пребывания сплава при охлаждении в случае последующего заполнения разделки примерно в три раза больше — 22 сек. Малый градиент максимальных температур, начиная с 800°С и ниже, обусловлен интенсивным теплоотводом во внутреннюю медную оправку. Структурные превращения при ЭЛС сплава Zr — 2,5% Nb в зоне сплавления происходят в диапазоне скоростей охлаждения, не вызывающих появления мартенситных структур — 9,5—30°С/сек. Структура металла в этом случае представляет собой структуру отжига при различных температурах, только в металле корня шва можно ожидать появления закалочных структур. Длительная выдержка при температурах выше $\alpha \rightleftharpoons \beta$ -превращения (выше 862°С) может вызвать перегрев металла в околошовной зоне и существенный рост зерна.

В сварном соединении сплава Zr — 2,5% Nb отчетливо наблюдаются различные зоны, характеризующиеся размером зерна, типом структуры, количеством и распределенностью структурных составляющих и степенью приближения структуры металла к равновесному состоянию. Структура основного металла является типичной двухфазной неравновесной структурой проката и состоит из деформированных участков твердого раствора ниобия в цирконии — α -фазы и твердого раствора циркония в ниобии β_{Nb} -фазы. Структура металла корня шва является структурой закалки с большим количеством игольчатых выделений мартенситного типа и состоит из пересыщенного твердого раствора ниобия в α_{Zr} — α' -фазы.

Данные рентгеноструктурного анализа свидетельствуют о высокой степени пересыщения твердого раствора. Структура металла наплавки (2-й и 3-й проходы) представляет собой двухфазную структуру из крупных выделений α - и α' -фаз, близкую к видманштеттовой. В металле околосшовной зоны наблюдается полная перекристаллизация и рост зерна. В зоне сплавления (6 мм от оси шва) присутствуют выделения равновесной α - и неравновесной α' -фаз, а также содержится остаточная, непревращенная β_{Zr} -фаза. При дальнейшем удалении от зоны сплавления первичные зерна β_{Zr} -фазы измельчаются, а внутри этих зерен заметно выделение α - и α' -фаз не только в виде игл, но и в глобулярном виде малого размера.

Различие в структуре сварного соединения отразилось на характере изменения твердости металла различных зон. Минимальное значение твердости присуще металлу шва, зоны сплавления и зоны термического влияния (от 178 HV по оси шва до 195 HV на расстоянии 20 мм от оси шва). Зона с минимальной твердостью (на расстоянии 8—12 мм от оси шва) соответствует области $\beta \rightarrow \alpha$ -превращения в исследуемом сплаве, где происходит изменение типа структуры и рост зерна.

Распределение ТЭП по зонам сварного соединения характеризуется крайне резкой неравномерностью, что подтверждает приведенные выше данные о структурной неоднородности соединения.

В связи с малой величиной компоненты напряжения σ_z , нормальной к срединной поверхности, напряженное состояние в сварных соединениях исследуемого трубчатого образца рассматривали как плосконапряженное двухосное. Максимальные растягивающие (как наиболее опасные в отношении коррозионной стойкости) напряжения σ_{xy} и σ_{yy} по своей величине значительно меньше предела текучести для сплава Zr—2,5% Nb [$\sigma_{xy}^{\max} = (0,4 \div 0,5) \sigma_{0,2}$; $\sigma_{yy}^{\max} \approx 0,1 \sigma_{0,2}$]. Такое низкое значение остаточных сварочных растягивающих напряжений объясняется малой величиной запаса температурной деформации αT по сравнению с $\epsilon_{0,2}$ и перераспределением остаточных напряжений вследствие корсетного эффекта. Ширина зоны растягивающих остаточных напряжений составляет 15—18 мм.

Максимальная величина пластических деформаций удлинения обнаружена в наплавленном металле и достигает 1,8%. Ширина зоны пластических деформаций удлинения составляет около 20 мм.

Величины максимальной разрушающей нагрузки и пластичность, характеризуемая углом загиба, при испытаниях на

изгиб для металла различных зон сварного соединения практически одинаковы. Испытания на растяжение позволили выявить, что прочность сварных соединений составляет около 80% от прочности основного металла трубы. Несколько меньшая прочность и повышенная пластичность металла околошовной зоны при механических испытаниях объясняются процессами снятия наклепа, вызванного прокаткой труб и ростом зерна.

Электрохимическая неоднородность сварного соединения сплава характеризуется более отрицательным значением электродного потенциала наплавленного металла по сравнению со значениями потенциалов металла остальных зон.

Неоднородность сварного соединения сплава $Zr - 2,5\% Nb$ как по структуре, так и по фазовому составу отчетливо проявилась при коррозионных испытаниях в потоке паро-водяной среды. В сварном соединении наблюдаются зоны с различной стойкостью против коррозии. Металл шва и зоны термического влияния ($W_{охл} \geq 32-35^\circ C/сек$) обладает минимальной стойкостью; зоны, нагревавшиеся в диапазоне температур $800-830^\circ C$ и $550-580^\circ C$ и охлаждавшиеся со скоростями $10-12$ и $4-5^\circ C/сек$, соответственно, отличает высокая коррозионная стойкость, приближающаяся к стойкости основного металла. Привес сварных образцов при динамических испытаниях на стенде в течение 4000 час. довольно значительный и равен 160 мг/дм^2 .

Термодинамический анализ работы сварного соединения сплава $Zr - 2,5\% Nb$ в активной среде и коррозионные испытания образцов-имитаторов позволили определить разрушение соединений сплава при эксплуатации в паро-водяной среде как процесс избирательной структурной коррозии. На основании анализа результатов коррозионных испытаний в работе предложена модель коррозионного разрушения сварных соединений сплава $Zr - 2,5\% Nb$, где показано, что основным фактором, определяющим стойкость соединения в активной среде, является неоднородность соединения как по типу структуры, так по фазовому составу.

Остаточные растягивающие напряжения, не являясь определяющим фактором, при определенной степени наводороживания также могут понизить стойкость сварных соединений при эксплуатации в агрессивной среде. Совершенно очевидно, что методы повышения коррозионной стойкости соединений должны быть направлены в первую очередь на уменьшение структурно-химической неоднородности.

Глава IV. Влияние методов, технологии сварки и термической обработки на свойства и коррозионное поведение сварных соединений сплава $Zr - 2,5\% Nb$

С целью обоснованного выбора способа сварки в работе проведено изучение свойств сварных соединений сплава, полученных при помощи аргонно-дуговой и электронно-лучевой сварки, и сварки в твердой фазе с длительным нагревом в вакууме. Ручная аргонно-дуговая сварка (АрДС) с заполнением разделки присадочной проволокой осуществлялась в камере с защитной атмосферой (аргоном марки А). Сварка в твердой фазе в вакууме ($1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.) производилась путем индукционного нагрева места соединения до температуры $1000^\circ C$, удельное давление составляло $0,4 \text{ кг/мм}^2$. Исследования показали, что значения скоростей охлаждения во всех зонах сварного соединения как в случае АрДС, так и при ЭЛС имеют одинаковое распределение во времени. В связи с большей распределенностью теплового поля вольфрамовой дуги по сравнению с электронным лучом и большей продолжительностью пребывания металла соединения в области высоких температур при АрДС размеры зоны перекристаллизации и зоны термического влияния в случае использования АрДС увеличиваются примерно в два раза по сравнению с ЭЛС по штатной технологии. Термический цикл сварки в твердой фазе в вакууме приближается к циклу высокотемпературного отжига, продолжительность пребывания сплава при температурах выше фазовых превращений составляет $4,7 \text{ мин.}$, скорости охлаждения металла отдельных зон находятся в пределах от $2,2$ до $0,8^\circ C/\text{сек.}$

Высокая твердость наплавленного металла при АрДС объясняется повышенной степенью поглощения газов (водорода, кислорода и азота) из аргона. Уменьшение твердости сплава при АрДС и ЭЛС в околосварной зоне связано с явлениями перекристаллизации. В случае сварки в твердой фазе с нагревом в вакууме зона соединения шириной 2 мм характеризуется также более высокими значениями твердости ($H\mu$), чем остальные зоны соединения, в связи с наличием включений окисной пленки в месте стыка труб. Особенности термического цикла при сварке в твердой фазе с нагревом в вакууме способствуют более полному протеканию процессов диффузии и равномерному распределению ниобия в различных зонах соединения (одинаковое значение ТЭП в металле различных зон).

Наименьшая завершенность процессов диффузии в сплаве при АрДС определяет резкий градиент значений ТЭП в наплавленном металле и металле околошовной зоны.

Величина и характер распределения остаточных сварочных напряжений практически одинаковы как при ЭЛС за три прохода, так и при АрДС с заполнением разделки присадочной проволокой. В связи с протеканием процессов релаксации при сварке в твердой фазе с нагревом в вакууме остаточные напряжения практически отсутствуют.

Применение АрДС при изготовлении узлов из сплава $Zr - 2,5\% Nb$ определяет резко неравномерный характер распределения механических свойств в различных зонах соединения, в противоположность этому способу сварки применение ЭЛС и сварки в твердой фазе с нагревом в вакууме позволяет уменьшить неоднородность механических свойств.

В работе было проведено исследование влияния режимов ЭЛС на свойства металла отдельных зон соединения сплава $Zr - 2,5\% Nb$. Обнаружено, что с увеличением погонной энергии и числа проходов растет ширина зоны металла, где происходят $\beta \rightarrow \alpha$ -превращения. Градиент температур в поперечном сечении соединения увеличивается с уменьшением погонной энергии («жесткостью» цикла). Для «жесткого» режима ЭЛС (однопроходная сварка встык без разделки кромок) характерен значительный градиент скоростей охлаждения в металле различных зон соединения. При сварке на «мягком» режиме (наплавка в разделку за три прохода) имеют место более низкие скорости охлаждения. Изменение характеристики термического цикла ЭЛС возможно путем регулирования величины погонной энергии, т. е. путем изменения тепловой мощности луча или скорости сварки. Как показывают данные ТЭП, увеличение числа проходов (увеличение погонной энергии) уменьшает структурную неоднородность сварного соединения, снижает максимальные значения ТЭП в зоне сплавления и зоне термического влияния. Увеличение погонной энергии и числа проходов до трех и шести вызывает рост величины растягивающих напряжений σ_{xy} от $+7 \text{ кг/мм}^2$ для ЭЛС за один проход до $+18 \text{ кг/мм}^2$ для сварки за шесть проходов; с увеличением числа проходов градиент растягивающих остаточных напряжений и жесткость схемы напряженного состояния возрастают. Пластические деформации удлинения в наплавленном металле также растут от 0,7% для одного прохода до 1,8% и 4,1% для трех и шести проходов соответственно. Механические свойства металла различных зон соединений также зависят от величины погонной

энергии и числа проходов: при ЭЛС за шесть проходов, в отличие от других режимов сварки, имеет место резкое увеличение прочности и снижение пластичности металла шва и зоны сплавления за счет упрочнения при циклических тепло-сменах и появления закалочных структур (в наплавленном металле). Применение дополнительного интенсивного охлаждения зоны сварки (с помощью водоохлаждаемых внутренних оправок и массивных медных колец на наружной поверхности труб) позволяет значительно уменьшить степень неоднородности свойств сварных соединений сплава и снизить величину привеса металла соединений при эксплуатации в агрессивной среде.

Вследствие преобладающей зависимости свойств сварных соединений сплава $Zr-2,5\% Nb$ от состояния и типа структуры основным способом улучшения этих свойств является термическая обработка, в данном случае — отжиг в вакууме. Были исследованы следующие режимы отжига: а) отжиг в α_{Zr} -области ($500-580^\circ C$) и б) отжиг в области существования $(\alpha+\beta)$ -фаз ($700^\circ C$). Полученные данные позволяют сделать выводы, что:

а) отжиг сварных соединений при температурах, меньших температуры монотектоидного превращения, не вызывает заметного при оптических исследованиях изменения структуры; отжиг в области $(\alpha+\beta)$ -раствора изменяет структуру различных зон сварного соединения: появляются дисперсные выделения β_{Zr} из других фаз, увеличивается количество α_{Zr} на границах β_{Zr} -зерен;

б) отжиг в вакууме при температурах $500-700^\circ C$ позволяет практически полностью снять остаточные растягивающие напряжения и уменьшить величину пластических деформаций удлинения;

в) наиболее оптимальным, позволяющим значительно повысить стойкость сварных соединений сплава против коррозии, является отжиг в области температур $550-580^\circ C$; увеличение времени выдержки при отжиге в этом интервале температур способствует некоторому повышению коррозионной стойкости сварных соединений сплава $Zr-2,5\% Nb$.

Общие выводы

1. Разработана методика исследований, позволившая:

а) оценить величину и характер распределения отдельных показателей неоднородности свойств, определяющих отдельно

и во взаимосвязи работоспособность сварных соединений сплава $Zr-2,5\% Nb$ при эксплуатации в агрессивной среде;

б) создать в образцах из основного металла тот или иной вид неоднородности свойств определенной величины или их сочетания;

в) провести коррозионные испытания сварных соединений и образцов-имитаторов с заданной неоднородностью свойств с целью определения влияния отдельных показателей неоднородности свойств или их сочетаний на коррозионное поведение сварных соединений сплава.

2. Результаты исследования неоднородности свойств сварных соединений сплава $Zr-2,5\% Nb$ показали, что:

а) охлаждение металла сварного соединения при электронно-лучевой сварке при значениях эффективной погонной энергии, равных $1000-1250 \text{ кал/см}$, происходит со скоростями $42,5-67^\circ \text{C/сек.}$ в β -области и $9,5-30^\circ \text{C/сек.}$ в $(\alpha + \beta)$ -области; в металле корня шва возможно появление закалочных структур;

б) в сварном соединении сплава наблюдаются зоны металла с различным типом структуры, количеством и распределением фазовых составляющих: от неравновесной волокнистой структуры проката для основного металла и структуры, состоящей из выделений α - и α' -фаз, и остаточной β_{Zr} -фазы (металл зоны сплавления) до закалочных структур мартенситного типа в металле корня шва;

в) максимальные растягивающие напряжения в наплавленном металле по своей величине значительно меньше предела текучести сплава $Zr-2,5\% Nb$ и составляют $40-50\% \sigma_{0,2}$; максимальная величина пластических деформаций также наблюдается в металле шва и достигает $1,8\%$ при электронно-лучевой сварке по штатной технологии;

г) прочность сварных соединений составляет около 80% от прочности основного металла, причем металл околошовной зоны (где происходили $\beta \rightarrow \alpha$ -превращения) характеризуется несколько меньшим значением прочности и повышенной пластичностью;

д) в результате электрохимических исследований обнаружено, что металл шва и зоны термического влияния является более электрохимически активным, чем основной металл.

3. Структурно-химическая неоднородность сварного соединения сплава определяет его коррозионное поведение; минимальной коррозионной стойкостью обладает металл шва и зоны термического влияния, нагретый до температур

выше 900°C и охлаждавшийся со скоростями выше $32\text{—}35^{\circ}\text{C/сек.}$

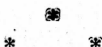
4. Исследование коррозионного поведения сварных образцов и образцов с заданными показателями неоднородности свойств, а также анализ сварного соединения как термодинамической системы позволили создать рабочую гипотезу, объясняющую механизм коррозионного разрушения сварного соединения сплава $\text{Zr} - 2,5\% \text{Nb}$.

5. Исследование влияния технологических факторов, способов сварки и термической обработки на коррозионное поведение сварных соединений исследуемого сплава показало, что:

а) увеличение погонной энергии (увеличение числа проходов) при электронно-лучевой сварке приводит к увеличению градиента и величины показателей неоднородности свойств в металле различных зон соединения;

б) перспективным способом сварки, позволяющим уменьшить степень неоднородности свойств, является сварка в твердой фазе с длительным нагревом в вакууме; из распространенных ныне способов сварки сплава (электронно-лучевая в вакууме и аргонно-дуговая) лучшим, с точки зрения повышения работоспособности сварных узлов в коррозионных условиях, является способ электронно-лучевой сварки с дополнительным охлаждением зоны сварки;

в) применение отжига в вакууме позволяет повысить коррозионную стойкость и уменьшить величину и характер распределения показателей неоднородности свойств, причем лучшим из исследованных режимов отжига является отжиг в области $500\text{—}550^{\circ}\text{C}$; увеличение продолжительности отжига повышает коррозионную стойкость сварного соединения сплава $\text{Zr} - 2,5\% \text{Nb}$.



По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. *Стеклов О. И., Лучкин Р. С.* Применение метода термоэлектрического потенциала для исследования неоднородности свойств сварных соединений, «Сварочное производство», 1970, № 12.

2. *Стеклов О. И., Лучкин Р. С.* Исследование неоднородности свойств сварных соединений методом термоэлектриче-

ских потенциалов, сб. докладов научно-технической конференции «Новое в сварочном производстве», Минск, 1—2 марта 1971.

3. *Стеглов О. И., Лучкин Р. С.* Экспериментальное определение упруго-пластического состояния в стыковых соединениях сплава циркония с 2,5% ниобия, «Автоматическая сварка», 1972, № 2.

4. *Стеглов О. И., Лучкин Р. С., Тюрин В. Н., Плышевский М. И.* Исследование неоднородности свойств сварных соединений сплава циркония с 2,5% ниобия, «Сварочное производство», 1972, № 4.

