

ОТЗЫВ

о диссертации Скутина Виталия Сергеевича «Разработка технологии сварки контейнеров для хранения и транспортировки отработавшего ядерного топлива, обеспечивающей хладостойкость сварных соединений при температурах до минус 50 °С», на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.10 – сварка, родственные процессы и технологии

Актуальность

Обращение с отработавшим (облученным) ядерным топливом (ОЯТ) является проблемой для всех стран, на территории которых находятся в эксплуатации ядерные объекты. В настоящее время в мире накоплено ~ 300 тыс. тонн ОЯТ. Выделение урана и наработанного плутония из ОЯТ и использование их в свежих твэлах позволяет экономии до 30 % естественного урана. Поэтому выгруженное из реакторов ядерное топливо может рассматриваться как стратегический государственный запас.

В соответствии с регламентом, отработавшие ТВС после выгрузки из активной зоны реактора размещаются в бассейнах выдержки на срок не менее 1 года с последующей транспортировкой в пристанционное хранилище и далее на радиохимический завод для переработки. Транспортировка отработавших ТВС является одной из важных и ответственных операций регламента обращения с ЯОТ в связи с его высокой активностью, тепловыделением после выгрузки из реактора, наличием значительного количества делящихся веществ, токсичностью радионуклидов.

Транспортировка ЯОТ производится в упаковочных комплектах (контейнерах) при температуре от 38 до -50 °С с учетом указанных выше свойств перевозимых материалов. Требования к упаковочным контейнерам регламентированы в ОПБЗ-83 и предусматривают испытания, имитирующие аварийные ситуации, включая падение с высоты 9 м и испытания на удар.

Учитывая условия эксплуатации и методы испытаний в подтверждение безопасной эксплуатации, для изготовления контейнеров ЦНИИ КМ «Прометей» разработана хладостойкая феррито-перлитная сталь марки 09Г2СА-А с высоким уровнем механических свойств и ударной вязкости при температурах от +250 до -50 °С. Контейнер представляет собой конструкцию с большим количеством сварных соединений (до 400), выполняемых методами ручной, полуавтоматической в защитных газах и автоматической сварки под флюсом. Однако хладостойкость металла швов, сваренных близкими по химическому составу к основному металлу композициями сварочных материалов С-Mn-Si и С-Mn-Ni не исследована. Кроме того, возможно, что сварочный нагрев снижает ударную вязкость основного металла (сталь 09Г2СА-А) в зоне термического влияния. В связи с этим цель и поставленные в диссертации задачи исследований основных факторов, способствующих формированию хладостойкой при -50 °С структуры металла шва и зоны термического влияния сварных соединений контейнера из стали марки 09Г2СА-А на уровне $\geq 29,4$ Дж/см² являются актуальными.

Основные научные результаты

В главе 1 диссертации изложено состояние вопроса хладостойкости сварных соединений кремнемарганцовистых сталей. На основании результатов исследований, изложенных в опубликованных источниках, правомерно сделан вывод, что наиболее перспективным путем для обеспечения приемлемой ударной вязкости сварных соединений низколегированных кремнемарганцовистых сталей при низких температурах является формирование в металле шва мелкозернистой структуры игольчатого феррита. Соискателем выполнен анализ влияния углерода, легирующих элементов и примесей на формирование структуры металла шва с химическим составом различных композиций. Описано влияние погонной энергии сварки, межваликовой температуры,

Вх. № 407		10.02.2016 г.		№	
Основн. 51		л.		подп.	
Прил.		л.		подп.	

В ДЕЛО

послесварочной термической обработки на ударную вязкость металла шва и зоны термического влияния сварных соединений. Обстоятельный обзор литературных данных позволил сформулировать задачи исследований по обоснованию химических композиций сварочных материалов и выбору оптимальных режимов сварки изделий из стали марки 09Г2СА-А,

Комплекс исследований структуры и свойств металла швов и сварных соединений из стали марки 09Г2СА-А подробно описан в главе 2. Среди них следует обратить внимание на дилатометрические исследования анизотермического распада аустенита в процессе охлаждения с различной скоростью в интервалах 800-500 °С и 1400-1200 °С образцов из металла швов композиций С-Mn-Si и С-Mn-Ni после нагрева до максимальной температуры 1300 и 1400 °С. Очень уместны для данной работы проведенные исследования влияния технологических параметров сварки на температурно-временные условия швов. Полученные термические циклы позволили установить зависимости между параметрами режима сварки, погонной энергией сварки, межваликовой температурой и скоростью охлаждения металла шва в интервалах температур выше 1200 °С ($T_{\text{сол.}}$) и 800-500 °С (наименьшей устойчивости аустенита). Исследования, связанные с оценкой влияния на структуру и свойства металла скорости охлаждения в интервале температур, близких к $T_{\text{сол.}}$, по-моему, проведены впервые. В опубликованных источниках других авторов такие исследования отсутствуют.

Результаты исследований, приведенные в главе 3, связаны с выбором унифицированной композиции химического состава сварочных материалов. На основании литературных данных выбраны композиции С-Mn-Ni (Ni=0,9-1,5 %) и С-Mn-Si. Результаты испытаний ударной вязкости металла шва, выполненного с применением ручной сварки покрытыми электродами, автоматической сварки под флюсом и полуавтоматической сварки в смеси защитных газов с проволокой сплошного сечения и порошковой проволокой, в состоянии после сварки и после термического отпуска приведены на рис. 3.1 (с. 85).

Факт отрицательного влияния термической обработки на ударную вязкость при температуре - 50 °С металла швов композиций С-Mn-Si и С-2Mn-Si (автоматическая сварка под флюсом проволоками Св-08ГС и Св-08Г2С, рис. 3.1 и таблица 3.5) можно считать установленным. При этом подтверждена также рекомендация по формированию в металле швов структуры игольчатого феррита для обеспечения его хладостойкости. Это относится и к швам композиции С- Mn-Ni.

В результате исследований в главе 4 влияния термокинетических условий на структурные и фазовые превращения соискателем впервые установлено, что формирование структуры металла швов исследуемых композиций зависит не только от скорости охлаждения в интервале температур 800-500 °С наименьшей устойчивости аустенита, но и в высокотемпературном интервале вблизи $T_{\text{сол.}}$. Повышение скорости охлаждения в области высоких температур, примыкающих к $T_{\text{сол.}}$, до 60 °С/с обеспечивает в металле швов формирование структуры, представляющей преимущественно игольчатый феррит с высокой хладостойкостью. Установлено, что образование игольчатого феррита обеспечивается при охлаждении со скоростями 40-60 °С в интервале 1200-800 °С и 20-30 °С – в интервале 800-500 °С. Показано, что регулирование скорости охлаждения металла шва в области высоких температур эффективно достигается регулированием силы сварочного тока, напряжения и скорости сварки, а в области наименьшей устойчивости аустенита – за счет скорости сварки и межваликовой температуры.

В главе 5 приведены результаты модернизации химического состава сварочных материалов кремнемарганцевых композиций в части содержания вредных примесей (серы не более 0,012 и фосфора - 0,013%). Обстоятельные исследования проведены по свариваемости основного металла – стали 09Г2СА-А. На основании результатов исследований влияния погонной энергии и других технологических параметров сварки установлены пути минимизации отрицательного влияния термического цикла сварки на основной металл. Обоснованы требования и экспериментально

подтверждены условия формирования хладостойкой до -50°C структуры металла зоны термического влияния сварных соединений стали 09Г2СА-А.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций

На защиту диссертации соискателем вынесены выявленные им закономерности и условия формирования хладостойкой при -50°C структуры металла швов и сварных соединений, выполненных автоматической сваркой под флюсом, дуговой сваркой покрытыми электродами, ручной и полуавтоматической сваркой в защитных газах с применением сварочных материалов базовых композиций С-Mn-Si и С-Mn-Ni.

При экспериментальных исследованиях обосновано, что формирование феррито-бейнитной структуры, в которой доминируют кристаллы игольчатого феррита, способствует хладостойкости металла швов с химическим составом, соответствующим композициям С-Mn-Si и С-Mn-Ni. Об этом свидетельствуют результаты механических испытаний металла швов со структурой игольчатого феррита, выявленной при металлографических исследованиях испытанных образцов. В исходном состоянии после сварки и после термической обработки минимальные значения ударной вязкости при -50°C металла швов композиций С-Mn-Si и С-Mn-Ni со структурой игольчатого феррита были выше 70 Дж/см^2 .

По результатам термокинетических исследований для металла швов композиций С-Mn-Si и С-Mn-Ni соискателем построены диаграммы распада аустенита $\gamma \rightarrow \alpha$, с помощью которых были обоснованы рекомендации по диапазону величины скорости охлаждения металла швов, обеспечивающей получение феррито-бейнитной структуры с игольчатым ферритом. Полученные соискателем результаты испытаний реальных сварных соединений подтверждают, что характер структуры металла швов композиций С-Mn-Si и С-Mn-Ni зависит от скорости охлаждения, параметров режима сварки (величина сварочного тока, напряжение дуги, скорость сварки), температуры подогрева и межваликовой температуры, количества проходов и слоев наплавляемого металла. При этом впервые показано, что на формирование структуры металла шва влияет не только скорость охлаждения в температурном интервале $800-500^{\circ}\text{C}$ наименьшей устойчивости аустенита, но и скорость охлаждения от высоких температур, близких к $T_{\text{сол}}$. Для формирования хладостойкой структуры игольчатого феррита в металле сварных швов композиций С-Mn-Si и С-Mn-Ni соискатель вполне обоснованно рекомендует значения скоростей охлаждения при высоких температурах и в интервале наименьшей устойчивости аустенита $V_{1200-800}=40-60^{\circ}\text{C/с}$ и $V_{800-500}=20-30^{\circ}\text{C/с}$.

Для реализации указанных рекомендаций при разработке технологии сварки соискателем выполнены исследования зависимости термических сварочных циклов от погонной энергии, параметров режима сварки и межваликовой температуры. Использование построенных диаграмм распада аустенита при непрерывном охлаждении и результатов исследований термических циклов сварки можно считать вполне обоснованным для разработки рекомендаций оптимальных режимов и технологии сварки, обеспечивающих приемлемый уровень ударной вязкости металла сварных швов при температуре -50°C .

Испытания реальных сварных соединений подтверждают результаты лабораторных исследований влияния термического цикла сварки на ударную вязкость металла зоны термического влияния при сварке стали 09Г2СА-А. Ударная вязкость образцов сварных соединений с надрезом по линии сплавления с основным металлом и на удалении от линии сплавления зависит от режимов и технологии сварки. Показано, что применение оптимальных параметров режимов и технологических рекомендаций по сварке, предложенных для формирования хладостойкой структуры металла швов, не приводит к снижению свойств стали 09Г2СА-А при воздействии термического цикла сварки. Возможность применения предложенных режимов и рекомендаций по технологии сварки оборудования из стали 09Г2СА-А подтверждена и обоснована при аттестации технологии сварки указанной стали в соответствии с ПНАЭ Г 7-010-89 и РД 5.УЕИА.3153/3232-99. Использование

разработанной технологии сварки и сварочных материалов композиций С-Mn-Ni и С-Mn-Si для металлоконструкций контейнеров из стали 09Г2СА-А методами ручной дуговой сварки покрытыми электродами, автоматической сварки под флюсом, ручной и механизированной сварки в защитных газах ($Ar + CO_2$) одобрено Федеральной службой «Ростехнадзор».

Замечания

На рис. 3.1 можно увидеть, что при $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ударная вязкость металла швов композиций С-Mn-Ni и С-Mn-Si, выполненных ручной, автоматической и полуавтоматической сваркой, не всегда удовлетворяет критерию хладостойкости $KCV \geq 29,4\text{ Дж/см}^2$ даже в исходном после сварки состоянии. Термический отпуск во всех случаях значительно снижает ударную вязкость металла шва. В данном случае, очевидно, не использованы разработанные соискателем рекомендации по обеспечению хладостойкости сварных соединений. Но об этом можно только догадаться! Каких-либо разъяснений по технологии сварки опытных соединений для последующих испытаний металла швов в п.3.1 диссертации не приводится. Было бы наглядным и не возникали бы вопросы, если бы анализ термокинетических диаграмм в п. 3.2 с описанием структур проводился со ссылками на результаты испытаний ударной вязкости, приведенных на рис. 3.1. Не лишней была бы информация о погонной энергии сварки, подогреве, межваликовой температуре. Это замечание связано с недостаточно полным изложением полученных результатов.

Влияние основных параметров режима сварки ($I_{св}$, U_d , $V_{св}$) на ударную вязкость металла шва при $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ в исходном состоянии и после термической обработки более полно изложено в п. 3.2.6 (таблица 3.5). Однако и здесь следует сделать замечание. В текстовой части п. 3.2.6 (абзац второй) указано, что для автоматической сварки под флюсом использована проволока Св-08ГС (композиция С-Mn-Si), а в таблице 3.5 этого пункта указана марка Св-08Г2С (композиция С-2Mn-Si – обозначение в соответствии с рис. 3.1). Судя по величине ударной вязкости металла шва при $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (90 Дж/см^2 в исходном состоянии и 132 Дж/см^2 после термической обработки), можно допустить, что проволока Св-08Г2С действительно использована для «автоматных» швов с погонной энергией сварки $1,63\text{ кДж/мм}$. Можно также допустить, что в таблице 3.5 допущена ошибка - два других шва действительно сварены с применением проволоки Св-8ГС. Этим объясняются выпадения по величине ударной вязкости при $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до 10 Дж/см^2 . Если это так, то проволока Св-08ГС для автоматической сварки контейнеров не подходит, так как сварные швы не удовлетворяют требованиям хладостойкости по критерию $KCV^{-50} \geq 29,4\text{ Дж/см}^2$.

Приведены результаты испытаний ударной вязкости металла шва, выполненного проволокой и покрытыми электродами с химическим составом композиции С-Mn-Ni-Mo, а также порошковой проволокой с химическим составом композиций С-Mn-Ni, С-Mn-2Ni, С-Mn-3Ni, С-2Mn-2Ni и С-2Mn-S. В дальнейшем эти композиции не упоминаются, поэтому не понятно, зачем они приведены

Заключение

Совокупность полученных научных результатов и предлагаемых решений позволяет прийти к выводу, что диссертация В.С. Скутина является законченным научным исследованием, направленным на разработку технологии сварки металлоконструкций контейнеров из кремнемарганцовистой стали марки 09Г2СА-А, предназначенных для хранения и транспортировки отработавшего ядерного топлива при температурах до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Материалы диссертации опубликованы в изданиях перечня ВАК (4 статьи), зарубежном журнале «Inorganic Materials», в сборниках докладов конференций (9 сообщений) и патентах (3 патента).

Выявленные соискателем закономерности и условия формирования хладостойкой при -50 °С структуры металла швов и сварных соединений, выполненных автоматической сваркой под флюсом, дуговой сваркой покрытыми электродами, ручной и полуавтоматической сваркой в защитных газах с применением сварочных материалов базовых композиций С-Mn-Si и С-Mn-Ni являются новыми и значимыми для освоения изготовления металлоконструкций контейнеров.

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Автореферат по содержанию соответствует содержанию диссертации. Диссертация выполнена на высоком научном уровне, соответствует критериям «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор Скутин Виталий Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.10 – сварка, родственные процессы и технологии.

Официальный оппонент,
д-р техн. наук, профессор



Зубченко
Александр Степанович

Заместитель генерального директора
по научной работе,
Акционерное общество «Ордена Трудового
Красного Знамени и ордена труда ЧССР
опытное конструкторское бюро
«ГИДРОПРЕСС»,
142103, г. Подольск, Московская обл.,
ул. Орджоникидзе, дом 21,
тел. (495) 502-79-10
E-mail: grpress@grpress.podolsk.ru

оформлен
11.02.16