

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОНЦЕВЫХ ДЕТАЛЕЙ ТВЭЛОВ С ТРУБАМИ ИЗ СПЛАВА $Zr1Nb$ , ВЫПОЛНЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ СВАРКИ



**С.А. Сиренко**

*Окончил Харьковский Национальный университет в 1999 году*

**ННЦ ХФТИ НТК ЯТЦ**

**Украина, 61108, г. Харьков, ул. Академическая, 1**

Представлены результаты исследований структуры и коррозионной стойкости сварных швов и зон термического влияния сварных соединений, полученных на изделиях из сплава  $Zr1Nb$  методами электронно-лучевой, электродуговой сварки в атмосфере аргона и гелия контактной стыковой сварки сопротивлением.

### ВВЕДЕНИЕ

Комплексная программа создания ядерного топливного цикла в Украине концептуально базируется на использовании национальных сырьевых ресурсов, производственного и научно-технического потенциала в области ядерных технологий. Основной задачей программы является интеграция циркониевых комплектов украинского производства в ядерное топливо для реакторов ВВЭР-1000. При этом большое значение имеет обоснование работоспособности оболочек из сплава  $Zr1Nb$  в конструкциях твэлов.

Традиционными способами герметизации тепловыделяющих элементов водо-водяных энергетических реакторов, которые эксплуатируются в Украине, являются электронно-лучевая сварка и контактная стыковая сварка сопротивлением по методу КСС-2 [1,2], разработанные в России.

За рубежом известно использование для этих целей электродуговой сварки с вольфрамовым электродом в атмосфере гелия и аргона [3].

В связи с разработкой и освоением производства отечественных циркониевых твэльных труб и деталей тепловыделяющих сборок из них возникает задача разработки технологических процессов получения сварных соединений на этих изделиях. Представляет интерес исследование сварных швов сплава  $Zr1Nb$  украинского производства в конструкциях твэлов реакторов типа ВВЭР.

Данная работа посвящена изучению, структуры и коррозионной стойкости сварных швов и зон термического влияния соединений, полученных на изделиях из сплава  $Zr1Nb$  методами электронно-лучевой, электродуговой сварки в атмосфере аргона и гелия и контактной стыковой сварки сопротивлением.

В качестве исследуемых материалов использовали опытные твэльные трубы из циркониевого сплава  $Zr1Nb$  украинского производства и штатные твэль-

ные трубы из сплава российского производства Э110.

### МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Металлографические исследования проводили по лабораторной методике.

Она заключалась в изготовлении шлифов (продольное сечение сваренных труб и концевых деталей) путем обработки на шлифовальной бумаге различных номеров с последовательным уменьшением зернистости, далее следовало полирование на шелке с алмазными пастами и травление для выявления структуры. Изучение структуры проводили с использованием оптического микроскопа ММР-8. Микротвердость измеряли микротвердомером ПМТ-3.

Коррозионные испытания сварных соединений проводили в составе макетов твэлов по методике экспрессных коррозионных испытаний в парах воды при температуре 400 С, давлении 20 МПа в течение 72 ч.

### МАТЕРИАЛЫ И ОБРАЗЦЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалом для исследований служили твэльные трубы из сплава  $Zr1Nb$ , изготовленного на основе кальциетермического циркония, и серийные оболочечные трубы из сплава Э110 российского производства. Для изготовления труб из сплава  $Zr1Nb$  использовали слитки четырех опытных плавов № 797, 803, 904 и 906, выплавленных на Приднепровском химическом заводе (ПХЗ, г.Днепродзержинск). Опытные партии твэльных труб были изготовлены в Днепропетровском Государственном трубном институте (ГТИ, г.Днепропетровск) и Южном трубном заводе (ЮТЗ, г.Никополь). Основным отличием сплава  $Zr1Nb$  разных плавов от базового сплава

Э110 является превышение содержания кислорода на 0,02...0,04 мас.%. Содержание других примесей находилось в пределах технических условий.

Электронно-лучевую сварку выполняли на установке ЭЛА-15, электродуговую сварку вели в атмосфере инертных газов на промышленной установке СА-281, имеющей усовершенствованную систему вакуумирования и очистки газов. Для контактной стыковой сварки сопротивлением использовали разработанную в НИЦ ХФТИ установку САГ-100 с модернизированным цанговым зажимом, обеспечивающим нагрев преимущественно внутреннего слоя твэльной трубы. Исследование сварных соединений сплавов Zr1Nb и Э110 на коррозионную стойкость проверили в составе макетов твэлов, разработанные для вне реакторных испытаний [4,5]. Конструкции узлов сварных соединений на макетах твэлов были близки к аналогичным конструкциям твэлов промышленных вариантов. Они приведены на рис.1 и 2.

От твэлов серийного производства макеты твэлов отличались меньшей длиной и отсутствием топливных таблеток внутри оболочки. Вместо последних использовали имитаторы в виде стержней из нержавеющей стали.

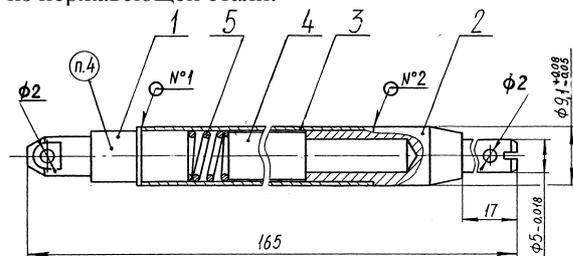


Рис.1. Конструкция макета твэла с заглушками, приваренными ЭЛС и ЭДС:

1- верхняя заглушка; 2 - нижняя заглушка; 3 – оболочка; 4 - сердечник-имитатор; 5-поджимная пружина. Обозначения: №1-электродуговая сварка (ЭДС); №2-электронно-лучевая сварка (ЭЛС)

Образцы для металлографических исследований готовили из сварных соединений, полученных на режимах сварки, отработанных ранее [2,5]. Они приведены в таблице.

С целью предотвращения значительного роста зерна и снижения коррозионной стойкости ЭДС и ЭЛС вели при повышенной скорости сварки, назначаемой с учетом качественного формирования шва, и с использованием цанг-холодильников. Высокое качество сварных соединений было подтверждено при испытании на герметичность гелиевым течеискателем ПТИ-10. Каких-либо дефектов сплошности типа трещин, непроваров, пор ни в одном из исследуемых соединений не было обнаружено.

Длина макетов твэлов, выполненных по конструкции (см. рис.1), составляла 165 мм, на рис.2 – 55 мм. Наружный диаметр равнялся 9,1 мм. Оболочка и заглушки макетов твэлов были изготовлены как из сплава Zr1Nb различных плавок, так и из штатного сплава Э110. Толщина стенки оболочки равнялась 0,65 мм. Оболочка с обеих сторон была

загерметизирована заглушками, которые имели различную конструкцию.

На макетах твэлов обеих конструкций сварной шов №2 выполнен ЭЛС. Сварной шов №1 на макетах твэлов (см. рис.1), выполнен электродуговой сваркой в инертной атмосфере. Причем, половина от их общего числа была загерметизирована при использовании в качестве защитного газа аргона, а при герметизации второй половины макетов твэлов использовали гелий.

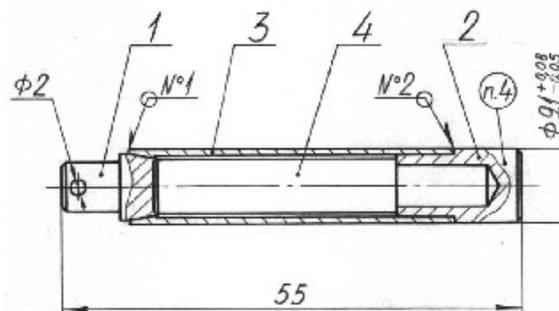


Рис.2. Конструкция макета твэла с заглушками, приваренными ЭЛС и КСС:

1- верхняя заглушка; 2 - нижняя заглушка; 3 – оболочка; 4 - сердечник-имитатор. Обозначения: №1-контактная стыковая сварка сопротивлением (КСС); №2-электронно-лучевая сварка (ЭЛС)

На макетах твэлов, изготовленных по рис.2, сварной шов №1 был выполнен контактной стыковой сваркой сопротивлением на агрегате САГ-100. Внутри оболочки макетов твэлов всех конструкций помещали стальной сердечник 4.

Макеты твэлов готовили следующим образом. Перед сборкой производилась комплектация оболочки и заглушек. После обезжиривания поверхности образцов, осуществлялась приварка к оболочке нижней заглушки электронно-лучевой сваркой на установке ЭЛА-15.

Снаряженные таким образом заготовки макетов твэлов, изготовленные по конструкции (см. рис.1) загружалась в камеру установки СА-281 для приварки второй заглушки электродуговой сваркой в атмосфере очищенного аргона или гелия. Второй конец заготовок макетов твэлов, изготовленных по рис.2, фиксировался в цанговом зажиме установки САГ-100 и герметизировался контактной стыковой сваркой сопротивлением. На изготовленных таким образом макетах твэлов проверялось состояние поверхности и качество сварных соединений, после чего они обезжиривались и протравливались в растворе состава: 5 %HF +45 %HNO<sub>3</sub> +50 % H<sub>2</sub>O.

## СТРУКТУРА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В результате металлографических исследований структуры сварных соединений с трубами из сплавов Zr1Nb и Э110, полученных электронно-лучевой и электродуговой сваркой, установлено, что в процессе перекристаллизации после расплавления металла с использованием этих видов сварки в сварном шве на образцах из обоих исследуемых

сплавов образовалась типичная структура в виде игл и пластин, в основной своей массе представляющая собой метастабильную  $\alpha'$ -фазу Zr с гексагональной

**Режимы сварки образцов из сплавов Zr1Nb и Э110 методами ЭЛС, ЭДС в аргоне, ЭДС в гелии и КСС**

Вид сварки	Диапазон режимов сварки							Примечания
	Ток сварки, А	Количество импульсов, шт	Скорость сварки, мм/с	Напряжение, В	Среда	Давление внутри камеры, Па	Длительность сварки, с	
ЭЛС	0,012	-	4.9	30000	Вакуум	$3,5 \cdot 10^{-3}$	-	-
ЭДС в аргоне	45	-	4,9	8	Аргон	$1,3 \cdot 10^5$	-	-
ЭДС в гелии	30	-	4,9	14	Гелий	$1,3 \cdot 10^5$	-	-
КСС	6500	2...4	-	8	Воздух	$1,0 \cdot 10^5$	0,04...0,08	Импульсный ток



Рис. 3. Микроструктура материала сварных швов на изделиях из сплава Zr1Nb, полученных электронно-лучевой сваркой, ув. 200

плотнупакованной решеткой. На шлифах сварных швов наблюдались границы зерен первичной  $\beta$ -фазы циркония. Их величина находилась в пределах значений 200...400 мкм (рис. 3).

В зоне термического влияния в направлении от металла с литой структурой размер зерен равномерно уменьшался до величины 6...12 мкм, то есть до размеров, характерных для металла в исходном состоянии (рис. 4).

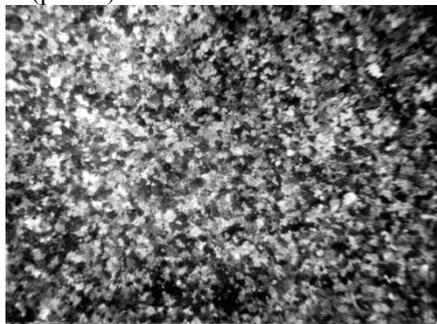


Рис. 4. Структура материала трубки из сплава Zr1Nb в исходном состоянии, ув. 200

Измерение микротвердости на образцах сплавов Zr1Nb и Э110 в зоне, не подверженной термическому влиянию при сварке и в сварном шве показало

следующее. Микротвердость сплава Zr1Nb в исходном состоянии была выше, чем у сплава Э110 и составляла 1900...2100 МПа. В сплаве Э110 она равнялась 1200...1400 МПа. Это связано с разным содержанием примесей кислорода в сплаве Э110 и Zr1Nb. При исследуемых режимах сварки заметного влияния на значения микротвердости в сварном шве режимов сварки, выполненных в аргоне и гелии, обнаружено не было. На образцах из сплава Zr1Nb после ЭЛС и ЭДС она составляла 2200...2700 МПа, а на образцах из сплава Э110 – 1500...1700 МПа, что свидетельствовало о повышении прочности материала в сварном шве по сравнению с исходным состоянием.

Исследование сварных швов на образцах из сплавов Zr1Nb и Э110, полученных по методу КСС показали, что заметного отличия в структуре исследуемых материалов нет. Протяженность сварного соединения при токе сварки 6500 А и временах сварки 0,04...0,08 с составляла на основной массе образцов не менее двух толщин стенки трубки. Граница раздела между соединяемыми деталями отсутствовала, что свидетельствовало об образовании соединения, имеющего металлическую сплошность. В зоне соединения структура незначительно укрупнилась, зерна имели вытянутую неправильную форму вдоль линии сварного шва. Их размер в шве не превышал 30 мкм. Наружный слой трубы благодаря интенсивному теплоотводу в латунную вставку цангового зажима сохранил первоначальную структуру основного металла. Измерение микротвердости в среднем поперечном сечении сварного шва показало, что микротвердость на образцах из сплава Zr1Nb на линии соединения трубы с заглушкой составляла 2000...2200 МПа, на участках, прилегающих к сварному шву – 2200...2400 МПа.

На образцах из сплава Э110 на этих участках микротвердость соответственно равнялась 1300...1450 МПа и 1400...1500 МПа.

Экспрессные испытания сварных швов в паре при температуре 400 °С, давлении 20 МПа в тече-

ние 72 ч, полученных ЭЛС, КСС, и большинство швов, полученных ЭДС, по цвету окисной пленки не отличались.

Сварные швы, выполненные КСС, были покрыты плотной и прочной окисной пленкой черного цвета, а на поверхности сварных швов и зон термического влияния, полученных ЭЛС и ЭДС в аргоне и гелии, образовались окисные пленки с сероватым оттенком.

Несмотря на отличия в примесном составе материала разных плавок качество сварных соединений сплава Zr1Nb находится на уровне серийных труб из сплава Э110.

### ВЫВОДЫ

1. Показано, что нет существенных отличий в исследуемых свойствах сварных соединений, полученных на изделиях из сплавов Zr1Nb и Э110 такими методами сварки, как ЭЛС, ЭДС в аргоне, ЭДС в гелии и КСС.

2. Установлено, что нет отличий по качеству сварных соединений сплавов Zr1Nb и Э110, выполненных ЭДС в аргоне и гелии.

3. Получение сварных соединений сплавов циркония методом КСС с сохранением верхнего слоя значительной толщины без изменения исходной структуры, с более протяженным сварным соединением по сравнению с ЭЛС и ЭДС, свидетельствует о большой перспективе использования этого способа сварки для герметизации оболочек твэлов из сплава Zr1Nb.

4. На базе экспрессных коррозионных испытаний моделей твэлов в паре длительностью 72 ч при 400°C показано, что сварные соединения, полученные ЭЛС, ЭДС и КСС, на макетах твэлов, изготовленных из сплавов Zr1Nb экспериментальных составов, имеют высокую коррозионную стойкость.

Автор выражает благодарность сотрудникам НТК ЯТЦ ННЦ ХФТИ Яковлеву В.К., Белашу Н.Н., Петельгузову И.А., Слабоспицкой Е.А., Черняевой Т.П. за оказанную помощь и консультации в подготовке статьи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Л.Т.Бабкин, А.А.Белов, А.А.Гусев и др. Новый метод контактной стыковой сварки сопротивлением для герметизации твэлов энергетических реакторов // *Технический прогресс в атомной промышленности. Серия: «Твэлостроение»*. 1987, вып. 3/19, с.13.
2. Н.Н.Белаш, В.Р.Татаринов, Н.И.Рагулина, В.К. Исследование влияния параметров ЭДС и КСС на характеристики и свойства сварных соединений сплава Zr-1%Nb кальциетермического производства // *Труды 14 Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению, 12-17 июня 2000 г., г. Алушта, Украина*. Харьков, 2000, с.127-128.
3. В.Пастухов. *Сварка циркониевых сплавов в реакторостроении*. Обзор. ФТИ АН УССР, г. Харьков, 1972г.
5. И.А.Петельгузов. *Лабораторная методика экспрессных коррозионных испытаний циркониевых сплавов* // МР.4508 ПМ, НТК ЯТЦ, Харьков, 1999.
4. В.С.Красноруцкий, И.А.Петельгузов, В.К.Яковлев и др. Исследование моделей твэлов реактора ВВЭР-1000, изготовленных из кальциетермического циркониевого сплава Zr-1%Nb после длительных коррозионных испытаний // *Труды 15-ой Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению, 10-15 июня 2002г. г. Алушта, Украина*. 2002. с.126
5. В.С.Красноруцкий, И.А.Петельгузов, В.Р.Татаринов и др. Исследование некоторых характеристик работоспособности экспериментального сплава Zr1Nb как материала для твэлов реактора ВВЭР-1000 // *Научные ведомости* / Под редакцией Камышанченко Н.В., 2001, №1(14), Белгород, 2001.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ КІНЦЕВИХ ДЕТАЛЕЙ ТВЕЛІВ З ТРУБАМИ ІЗ СПЛАВУ Zr1Nb, ЗРОБЛЕНИХ РІЗНИМИ ВИДАМИ ЗВАРКИ

*С.А. Сіренко*

*НТК ЯПЦ ННЦ ХФТИ, Україна, 61108, м. Харків, вул. Академічна, 1*

Представлені результати досліджень структури і корозійної стійкості зварних швів і зон термічного впливу зварних з'єднань, одержаних з виробів із сплаву Zr1Nb методами електронно-променевої, електродугової зварки в атмосфері аргону і гелію, контактної стикової зварки опором.

## STUDY OF WELDED JOINING OF THE FUEL ROD END DETAILS WITH CLADDING OF ALLOY Zr1Nb, PRODUCED DIFFERENT TYPES OF WELDING

*S.A. Sirenko*

***STC NFC NSC KIPT***

Results of structure studies and corrosion stability weld and areas of thermal influence of welded join, received on products from the alloy Zr1Nb methods electronic-beam, electroarc welding in atmosphere of argon and helium contact-but welding by the resistance have been presented.