

ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПОГЛОЩАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ

Н.Н. Белаиш, И.А. Чернов, В.Р. Татаринев, Е.А. Слабоспицкая, А.В. Куштым
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

Рассмотрены варианты сварных соединений, используемых в перспективных конструкциях поглощающих элементов с комбинированным поглотителем для регулирующих органов реактора ВВЭР-1000. Приведены результаты исследований особенностей формирования сварных соединений сплавов Э110-ГФЭ-1, ВТ1-ГФЭ-1, Э110-Э110 и ВТ1-ВТ1. Установлены зависимости ширины шва и глубины провара от величины погонной энергии при электродуговой сварке изделий в среде гелия, а также режимы, обеспечивающие получение качественных соединений. Представлены результаты металлографических исследований материалов сварных швов.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время специалисты ряда стран активно ведут работы, связанные с повышением безопасности и ресурса работы поглощающих стержней системы управления и защиты (ПС СУЗ) ядерных реакторов. Рассматриваются варианты использования поглощающих элементов (ПЭЛ) усовершенствованных конструкций, применения в них более эффективных поглощающих материалов и радиационно-стойких оболочек [1-3].

В реакторах PWR находят применение конструкции ПЭЛ с комбинированным поглотителем $B_4C-(Ag-15\% In-5\% Cd)$, причем традиционно используемый сплав Ag-In-Cd планируется в перспективе заменить на гафний, а оболочки из стали SS304 - на оболочки из SS316, в том числе и с защитными покрытиями [1].

Дальнейшее повышение безопасности и надежности эксплуатации ПС СУЗ реактора ВВЭР-1000 также связано с переходом на варианты конструкций ПЭЛ с комбинированными поглотителями. Верхняя часть оболочки таких ПЭЛ заполнена порошком карбида бора, а нижняя часть - поглощающим материалом, имеющим n, γ -реакцию с нейтронами. Поглощающие элементы, в нижней части которых используется порошок титаната диспрозия, а в качестве оболочки - никелевый сплав ЭП-630У (Ni-42 вес.% Cr-1 вес.% Mo), Московский завод полиметаллов производит с 1997 года [1,4]. В качестве перспективной замены титаната диспрозия рассматриваются гафний и гафнат диспрозия [3,5].

Известен ряд конструкций ПЭЛ, в которых нижняя часть выполнена в виде стержня из гафния диаметром, равным наружному диаметру оболочки [6-8]. Начальная физическая эффективность таких ПЭЛ близка к эффективности ПЭЛ, заполненных карбидом бора, а продолжительность работы может составлять более 15 лет.

Использование в ПЭЛ оболочек, совместимых с карбидом бора и гафнием, например, выполненных из циркониевого или титанового сплава, повышает надежность работы ПС СУЗ энергетических реакторов в аварийных ситуациях [8-10].

Целью данной работы являлось получение и исследование сварных соединений в поглощающих элементах, имеющих комбинированный поглотитель B_4C-Hf и оболочку из сплава на основе циркония или титана.

1. ВАРИАНТЫ КОНСТРУКЦИИ ПЭЛ

Наиболее простой в изготовлении из известных конструкций ПЭЛ с комбинированным поглотителем B_4C-Hf является конструкция, приведенная на рис. 1,а. Она включает оболочку (1), загерметизированную верхней (наконечником) (2) и нижней (3) концевыми деталями; поглощающий материал на основе карбида бора (4), расположенный внутри оболочки; верхний газосборник (5), отделенный от столба поглотителя (B_4C) газопроницаемой вставкой (6). Нижняя концевая деталь выполнена в виде сплошного стержня из гафния длиной около 500 мм. Оболочка изготовлена из сплавов на основе циркония или титана, производство которых наряду с гафнием освоено в Украине.

Усовершенствованным вариантом конструкции описанного выше ПЭЛ является вариант, приведенный на рис. 1,б. В данной конструкции нижняя концевая деталь выполнена в виде стержня с центральной полостью, которая от порошка карбида бора отделена газопроницаемой вставкой (7) и образует нижний газосборник (8). Наличие дополнительного газосборника снижает давление гелия, который выделяется из бора в результате n, α -реакции, на внутреннюю поверхность оболочки при достижении значительных выгораний ^{10}B .

Анализ перспективных конструкций ПЭЛ свидетельствует, что в большинстве случаев для соединения оболочек с концевыми деталями используются стыкозамковые соединения.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И МАТЕРИАЛЫ

Исследования проводили на изделиях, представляющих собой стыкозамковые соединения, конструкция которых приведена на рис. 2,а. Из-

деля состояли из деталей, имитирующих: оболочку $\varnothing 8,2$ мм с углублением на одном из торцов ПЭЛ, наконечник и поглощающий стержень. Имитаторы оболочки представляли собой патрубки

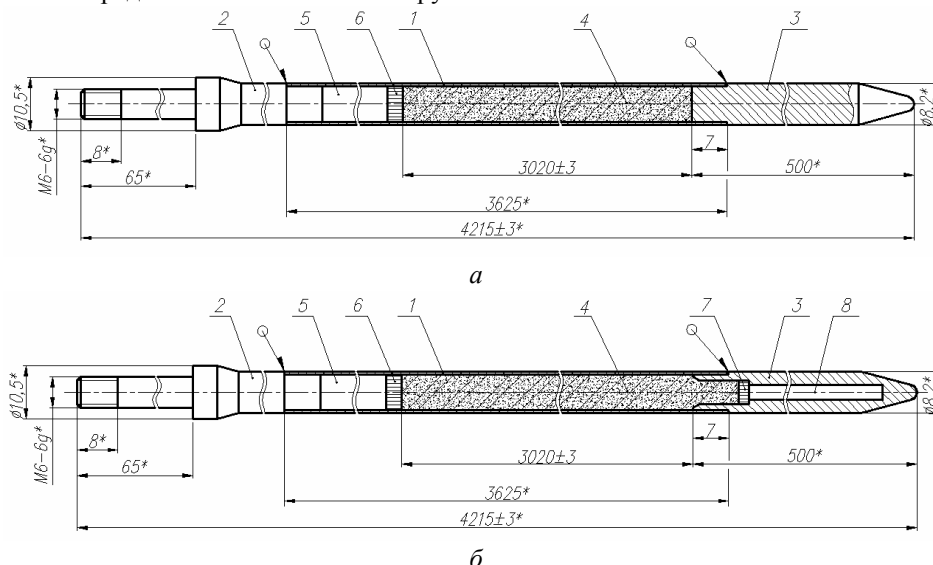


Рис. 1. Конструкция ПЭЛ ПС СУЗ реактора ВВЭР-1000 с поглотителем В₄С-Нф:
1 - оболочка; 2 - верхняя концевая деталь (наконечник); 3 - нижняя концевая деталь; 4 - карбид бора;
5, 8 - верхний и нижний газосборники; 6, 7 - газопроницаемые вставки

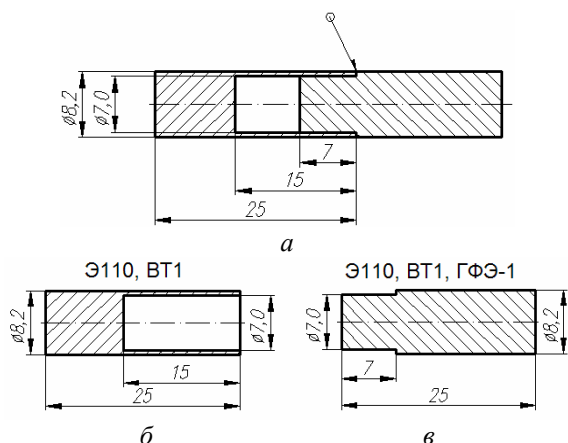


Рис. 2. Конструкция изделий для исследования влияния режимов электродуговой сварки в среде гелия на параметры сварных швов

В качестве имитаторов наконечника и поглощающего стержня служили стержни длиной 25 мм, на одном из концов которых выполнена проточка глубиной 7 мм (см. рис. 2, в). Детали наконечников и оболочек готовили из сплавов Э110 и ВТ1, а имитатор поглощающего стержня - из гафниевого сплава ГФЭ-1. Свойства используемых материалов приведены в таблице. При температурах ниже полиморфного перехода все три сплава имеют гексагональную плотноупакованную (ГПУ) решетку, а выше температуры полиморфного перехода кристаллическая решетка в них изменяется на объемно центрированную кубическую (ОЦК). Температуры плавления сплавов ВТ1, Э110 и ГФЭ-1 соответственно равняются: (1665 ± 5) , (1852 ± 10) , (2222 ± 30) °С (таблица).

Физико-механические свойства сплавов ВТ1, Э110, ГФЭ-1 [3,11-15]

Параметр	Единица измерения	Марка сплава		
		ВТ1	Э110	ГФЭ-1
Плотность	г/см ³	4,5	6,45	13,1
Температура плавления	°С	1665±10	1852±10	2222±30
Температура фазового перехода	°С	882	862	1760
Удельная теплоемкость	Дж/(г·град)	0,54	0,28	0,15
Предел прочности	МПа	450	400±25	460-480
Предел пластичности	МПа	380	326±14	215-235
Относительное удлинение	%	25	33±2	25-29
Коэффициент линейного расширения	×10 ⁻⁶ , град ⁻¹	8,3	5,9	5,9
Атомный радиус	нм	0,1563	0,1602	0,1580
Модуль Юнга	×10 ⁻³ , МПа	105	210	140
Коэффициент Пуассона	-	0,32	0,28	0,32

Используемые сплавы имеют относительно близкие механические свойства (см. таблицу), незначительную разность в размерах атомов, образуют при плавлении между собой непрерывный ряд твердых рас-

творов. Приведенные характеристики свидетельствуют о возможности получения качественных сварных соединений в изделиях из сплавов Э110 и ГФЭ-1, ВТ1 и ГФЭ-1.

Сварку изделий выполняли электродуговым способом в среде гелия на промышленной установке СА -281, оснащенной вакуумной камерой и системой очистки инертных газов.

При сварке детали, имитирующие оболочку, фиксировали в цанге. Расстояние от торца цанги к сварному шву равнялось 4 мм. Погонную энергию ($E_p = I \cdot U / v$, где I – ток, А; U – напряжение, В; v – скорость сварки, м/с) при сварке изменяли в диапазоне значений 44...112 Дж/мм. Сварку изделий выполняли, используя вольфрамовый электрод диаметром 2,0 мм, легированный оксидом лантана. В процессе сварки электрод (с целью концентрации энергии на более тугоплавком материале или более массивной части изделия) смещали от стыка свариваемых материалов на 0,5...0,8 мм в сторону стержня (см. рис. 2,в).

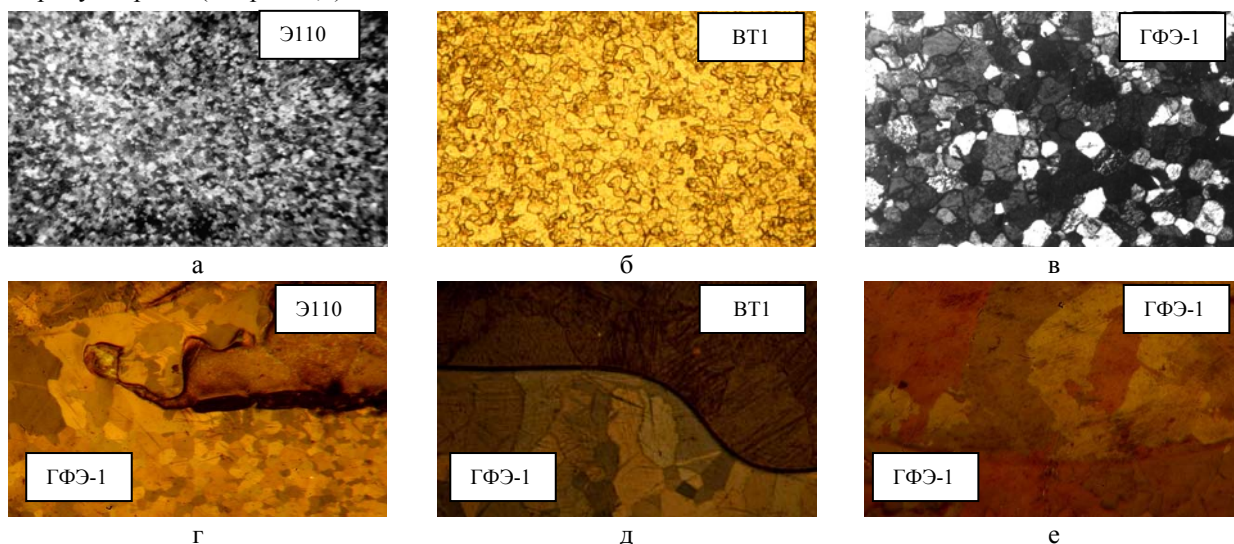


Рис. 3. Структура материалов в исходном состоянии и после сварки: а, б, в - сплавы Э110, ВТ1, ГФЭ-1 в исходном состоянии ($\times 200$); г - сварное соединение Э110-ГФЭ-1 ($\times 100$); д - сварное соединение ВТ1-ГФЭ-1 ($\times 100$); е - участок гафниевого стержня после расплавления и кристаллизации ($\times 200$)

Причем, при низких значениях погонной энергии наблюдалось неполное проплавление кромок (непрояр) (рис. 4,а). С увеличением погонной энергии глубина провара увеличивалась и при достижении значений ≥ 69 Дж/мм для соединения Э110-Э110 и ≥ 73 Дж/мм для соединения ВТ1-ВТ1 равнялась толщине оболочки (0,6 мм), что является одним из необходимых требований обеспечения качественных сварных соединений. Материал сварного шва соединения Э110-Э110 представлял собой α' -фазу Zr в виде игл и пластин шириной 2,5...6,5 мкм, длиной 30...90 мкм. Также в материале сварного шва наблюдались границы бывших β -зерен Zr размером 100...250 мкм. Материал сварного шва соединения ВТ1-ВТ1 состоял из равноосных зерен α -фазы Ti величиной 50...200 мкм. Микротвердость материала сварных швов была выше по сравнению с микротвердостью свариваемых материалов в исходном состоянии и составляла для соединения Э110-Э110 - 2,4...2,7 ГПа, а для соединения ВТ1-ВТ1 - 2,1...2,5 ГПа.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалы, используемые для изготовления сварных соединений, имели мелкозернистую рекристаллизованную структуру. Величина зерна в них равнялась: 5...12 мкм в сплаве Э110 (рис. 3,а), 7...20 мкм в сплаве ВТ1 (см. рис. 3,б), 30...70 мкм в сплаве ГФЭ-1 (см. рис. 3,в). Значения микротвердости соответственно составляли: 1,6...1,8 ГПа (Э110), 1,2...1,6 ГПа (ВТ1) и 2,0...2,3 ГПа (ГФЭ-1). Исследования сварных соединений показали, что характер их образования и структура материалов меняются в зависимости от марки соединяемых материалов и режимов сварки.

В сварных швах однородных материалов (Э110-Э110, ВТ1-ВТ1) края оболочки и стержня оплавливались равномерно и происходило формирование сварного шва с крупнозернистой неравномерной структурой.

Сварные соединения разнородных материалов можно условно разделить на три зоны. Первая располагалась на гафниевом стержне и представляла собой материал, закристаллизовавшийся после расплавления в первоначальный момент сварки. Вторая зона образовывалась на образце, имитирующем оболочку ПЭЛ, изготовленную из сплавов Э110 или ВТ1, имеющих более низкую температуру плавления по сравнению со сплавом ГФЭ-1. Формирование данной зоны происходило при достижении на участке, контактирующим с гафнием, температуры, близкой к температуре плавления Э110 или ВТ1. Третья зона представляла собой сплав контактирующих материалов, который образовывался в зоне сплавления.

В зоне 1 (см. рис. 4,в,г,д,е) в результате расплавления и кристаллизации сплава ГФЭ-1 формировалась крупнозернистая структура с величиной зерна 100...250 мкм (см. рис. 3,е). Значения микротвердости составляли 3,2...3,8 ГПа.

Свойства материалов в зоне 2 соединений Э110-ГФЭ-1 и ВТ1-ГФЭ-1 близки к характеристикам материалов сварных швов соответствующих однородных соединений.

Характер формирования и внешний вид зоны 3 в сварных соединениях Э110-ГФЭ-1 и ВТ1-ГФЭ-1 различались.

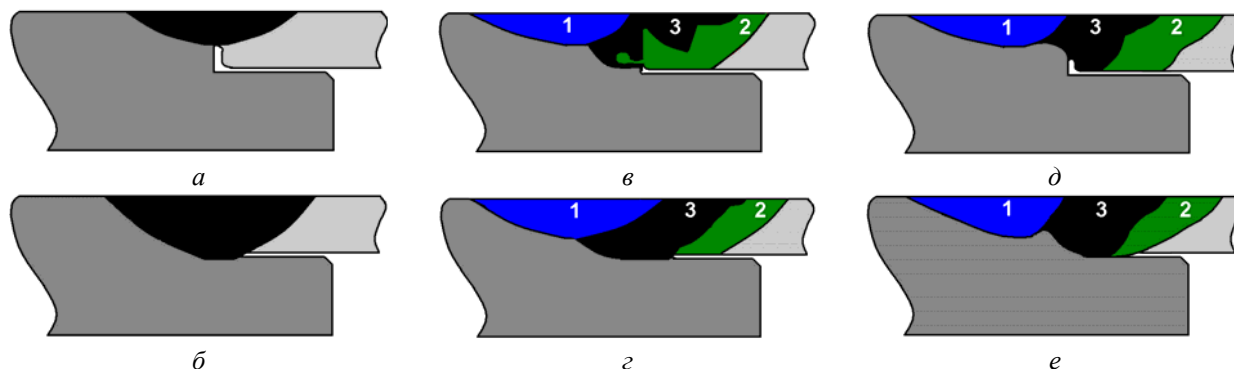


Рис. 4. Схема формирования сварных соединений: а, б - Э110-Э110 и ВТ1-ВТ1; в, г - Э110-ГФЭ-1; д, е - ВТ1-ГФЭ-1

После электродуговой сварки при низких значениях погонной энергии в зоне сплавления соединения Э110-ГФЭ-1 со стороны сплава Э110 наблюдались грубые пилообразные очертания границы раздела (см. рис. 4, в). На некоторых образцах в этой зоне образовывались островки нерасплавленного металла (см. рис. 3, г). Зона сплавления материалов ВТ1 и ГФЭ-1 имела ровные края и резко очерченную границу раздела с гафнием (см. рис. 3, д). Свообразные очертания границ сплавления со стороны сплава ГФЭ-1 в данных соединениях определялись интенсивностью процессов растворения. С увеличением погонной энергии линии

границы раздела становились плавными. Провар на всю толщину оболочки (см. рис. 4, г, е) наблюдался для соединения Э110-ГФЭ-1 при значениях погонной энергии ≥ 88 Дж/мм, а для соединения ВТ1-ГФЭ-1 при ее значениях ≥ 77 Дж/мм. Материал в зоне 3 указанных разнородных соединений имел близкие значения микротвердости, которые находились в диапазоне от 3,4 до 4,6 ГПа.

Результаты исследований зависимости параметров сварных швов (ширины шва и глубины провара) от значений погонной энергии приведены на рис. 5.

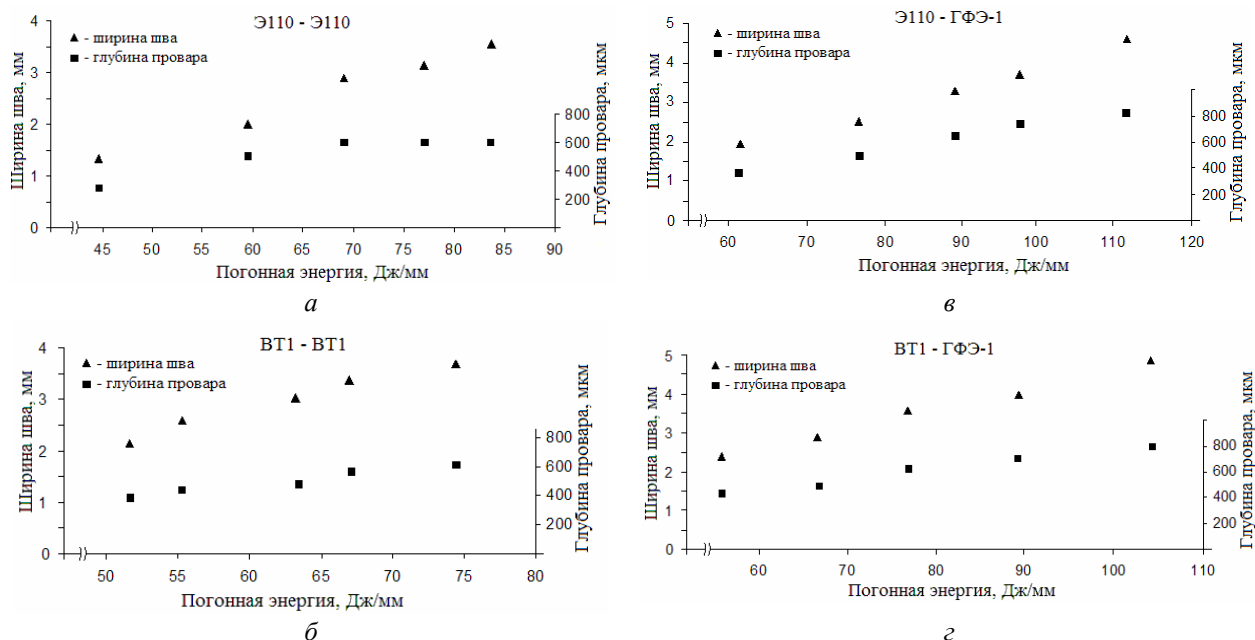


Рис. 5. Зависимость ширины шва и глубины провара от величины погонной энергии при электродуговой сварке в среде гелия для соединений: а - Э110-Э110; б - ВТ1-ВТ1; в - Э110-ГФЭ-1; г - ВТ1-ГФЭ-1

Наличие четкой границы раздела на шлифах соединений Э110-ГФЭ-1 и ВТ1-ГФЭ-1 позволило проследить зависимости глубины провара от погонной энергии до величин, превышающих толщину оболочки, что не удалось сделать на соединениях однородных материалов. Из приведенных графиков сле-

дует, что одинаковые глубины провара оболочки обеспечивались на соединениях Э110-Э110 при более низких значениях погонной энергии по сравнению с соединениями ВТ1-ВТ1 (см. рис. 5, а, б). В соединениях разнородных материалов Э110-ГФЭ-1 и ВТ1-ГФЭ-1 (сварка обо-

лочки с поглощающим стержнем) провар на полную толщину оболочки происходил при больших значениях погонной энергии соответственно на 30 и на 5% по сравнению с однотипными соединениями Э110-Э110 и ВТ1-ВТ1 (см. рис. 5,в,г). Ширина шва, соответствующая провару на всю толщину оболочки, для соединений Э110-Э110 и Э110-ГФЭ-1 составляла 2,9...3,1 мм, а для соединений ВТ1-ВТ1 и ВТ1-ГФЭ-1 - соответственно 3,4...3,6 мм.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В ряде перспективных конструкций ПЭЛ, обеспечивающих высокую начальную физическую эффективность ПС СУЗ, повышенную надежность и значительную продолжительность работы, нижняя часть выполнена в виде стержня из сплава на основе гафния, а оболочка изготовлена из материалов, совместимых с карбидом бора и гафнием при высоких температурах. В качестве материалов для таких оболочек предлагается использовать сплавы на основе циркония или титана [8,9]. Приведенные конструкции ПЭЛ включают сварные соединения разнородных материалов (Э110-ГФЭ-1 и ВТ1-ГФЭ-1), имеющих различные температуры плавления и физико-механические свойства.

Особенностью формирования сварных соединений из материалов с различной температурой плавления, при использовании электродуговой или электронно-лучевой сварки, по данным авторов работы [16], может являться: образование двойного шва и соответственно наличие в сечении шва нерасплавленной части тугоплавкого металла; наличие резких границ сплавления; образование областей с расслоением химического состава.

Выбранные в результате проведенных исследований режимы сварки цилиндрических образцов Э110-ГФЭ-1 и ВТ1-ГФЭ-1 обеспечивали получение качественных соединений. В отличие от соединений сплавов Э110-Э110 и ВТ1-ВТ1 в исследуемых сварных соединениях разнородных материалов прослеживалось образование трех зон, размещенных соответственно на гафниевом стержне, на оболочке ПЭЛ, в зоне сплавления свариваемых материалов, что, вероятно, обусловлено следующим механизмом.

В первоначальный момент сварки (поскольку сварочный электрод смещен от сварного шва на гафниевый стержень) происходит расплавление небольшого участка, расположенного у края стержня. После повышения температуры до определенной величины на контактирующих поверхностях в результате диффузии происходит образование сплавов, имеющих температуру плавления ниже, чем у сплава ГФЭ-1. При достижении этой температуры начинается процесс расплавления материала оболочки и образуется ванна жидкого металла. Далее происходит интенсивное растворение гафния и по мере повышения температуры увеличивается количество жидкой фазы и соответственно содержание в ней гафния.

В зависимости от температуры перегрева, интенсивности перемешивания, времени контактирования твердой и жидкой фаз формируются определенные очертания границ раздела.

Необходимость использования более жестких режимов сварки для получения качественных соедине-

ний ВТ1-ВТ1 (~73 Дж/мм), чем при сварке соединений Э110-Э110 (~69 Дж/мм) (несмотря на то, что сплав Э110 имеет более высокую температуру плавления по сравнению со сплавом ВТ1) обусловлена, вероятно, более высокими значениями удельной теплоемкости сплава ВТ1 (0,54 против 0,28 (Дж/(г·град)) для Э110) (см. таблицу).

Обеспечение провара на всю толщину оболочки из ВТ1 в соединении ВТ1-ГФЭ-1 при меньших значениях погонной энергии, чем при использовании оболочки из Э110 в соединении Э110-ГФЭ-1, по-видимому, можно объяснить следующим. Согласно диаграмме состояния Ti-Hf [17] линии ликвидус-солидус в области концентраций 60...80 вес.% Ti имеют точку перегиба с температурой плавления 1640 °С, поэтому изотермическая граница жидкой ванны при расплавлении сплавов на основе этих элементов близка к температуре плавления сплава ВТ1. По этой же причине согласно данным, полученным в работе [16], в зоне сплавления соединения ВТ1-ГФЭ-1, вероятнее всего, будет иметь место усреднение химического состава для большей ее части.

На кривых ликвидус-солидус диаграммы состояния Zr-Hf [18] точки перегиба отсутствуют, поэтому для качественной сварки соединения Э110-ГФЭ-1 необходимы режимы, обеспечивающие более высокие температуры, чем при сварке соединения ВТ1-ГФЭ-1. Причем, значительное усреднение химического состава в зоне сплавления в этом случае менее вероятно. Содержание элементов в ней определяется в основном величиной погонной энергии и величиной смещения источника энергии от стыка [16].

ВЫВОДЫ

1. Исследован характер формирования сварных соединений деталей поглощающих элементов, выполненных из материалов с различной температурой плавления: Э110-ГФЭ-1 и ВТ1-ГФЭ-1.

2. Установлены зависимости ширины шва и глубины провара оболочки от величины погонной энергии при электродуговой сварке в среде гелия для соединений Э110-ГФЭ-1 и ВТ1-ГФЭ-1 в сравнении с соединениями однородных материалов Э110-Э110 и ВТ1-ВТ1.

3. Определены режимы электродуговой сварки, обеспечивающие получение качественных соединений исследованных разнородных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Д. Рисованый, Е.Е. Варлашова, С.Р. Фридман. *Поглощающие материалы и органы регулирования реакторов ВВЭР-1000 и РWR. Состояние, проблемы и пути их решения*: Обзор. Димитровград, ГНЦ РФ НИИАР, 1998, 54 с.

2. В.И. Ряховских, С.В. Шмелёв, В.М. Чернышов и др. Современное состояние разработки и производства органов регулирования ядерных реакторов ВВЭР-1000 // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 1997, в. 1(65), 2(66), с. 110–118.

3. В.Д. Рисованый, В.П. Ключко, В.Б. Пономаренко. *Гафний в ядерной технике*. Димитровград: НИИАР, 1993, 140 с.
4. А.А. Афанасьев, В.С. Красноруцкий, И.М. Неключов. Поглощающие элементы на основе комбинированного поглотителя V_4C/Hf для украинских АЭС // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 1999, № 3, с. 85–90.
5. V.D. Risovani, A.Z. Zakharov, E.M. Muraleva, V.M. Kosenkov, R.N. Laturov. Dysprosium hafnate as absorbing material for control rods // *Journal of Nuclear Materials*. 2006, v. 355, p. 163-170.
6. Патент на винахід № 76216 від 17.07.2006, G21C7/08, G21C 21/00. *Поглиняльний стержневий елемент ядерного реактора (Варіанти)* / М.М. Белаш, В.С. Красноруцкий // *Бюллетень № 7*.
7. Патент Украины № 738 от 15.03.2001, G21C7/10. *Поглощающий стержневой элемент ядерного реактора* / В.С. Красноруцкий, В.Р. Татаринов, П.А. Чернов // *Бюллетень № 2*.
8. Патент № 11315 від 15.12.2005, МПК 7G21C 7/10. *Поглиняющий элемент ядерного реактора* / М.М. Белаш, В.С. Красноруцкий, М.О. Михайлов // *Бюллетень № 12*.
9. В.С. Красноруцкий, Н.А. Михайлов, Н.Н. Белаш, А.М. Абдуллаев, А.И. Жуков. Исследование эффективности и безопасности работы пэлов в циркониевой оболочке с поглотителем V_4C-Hf // *Ядерні та радіаційні технології*. 2005, т. 5 (№ 3-4), с. 49-59.
10. В.С. Красноруцкий, Н.Н. Белаш, А.М. Абдуллаев, А.И. Жуков, И.А. Петельгузов, Н.А. Михайлов, Е.А. Слабоспицкая. Разработка и некоторые характеристики работоспособности пэлов с поглотителем V_4C-Hf // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2007, № 2, с. 88-96.
11. М.В. Мальцев. *Металлография тугоплавких, редких и радиоактивных металлов и сплавов*. М.: «Металлургия», 1971, 488 с.
12. И.И. Корнилов. *Титан. Источники, составы, свойства, металлохимия и применение*. М.: «Наука», 1975, 310 с.
13. В.А. Гармата, А.Н. Петрунько, Н.В. Галицкий, Ю.Г. Олесов, Р.А. Сандлер. *Титан*. М.: «Металлургия», 1983, 559 с.
14. G.M. Hood. Point defect diffusion in α -Zr // *Journal of Nuclear Materials*. 1988, v. 159, p. 149-175.
15. О.А. Шматько, Ю.В. Усов. *Структура и свойства металлов и сплавов. Электрические и магнитные свойства металлов и сплавов*: Справочник. Киев: «Наукова думка», 1987, 582 с.
16. В.С. Новосадов, М.Х. Шоршоров. Особенности формирования и механические свойства разнородных соединений сплавов циркония, титана и ниобия при аргоно-дуговой сварке // *Физика и химия обработки материалов*. 1968, № 2, с. 92-100.
17. Р.П. Эллиот. *Структуры двойных сплавов*. М.: «Металлургия», 1970, т. II, с. 98-99.
18. М. Хансен, К. Андерко. *Структуры двойных сплавов*. М.: «Металлургия», 1962, т. II, с. 866-867.

Статья поступила в редакцию 28.07.2008 г.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ В ПЕРСПЕКТИВНИХ ПОГЛИНАЮЧИХ ЕЛЕМЕНТАХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕАКТОРІВ

М.М. Белаш, І.О. Чернов, В.Р. Татарінов, О.О. Слабоспицька, А.В. Куштим

Розглянуті варіанти зварних з'єднань, що використовуються в перспективних конструкціях поглинаючих елементів з комбінованим поглиначем для регулюючих органів реактора ВВЕР-1000. Наведено результати досліджень особливостей формування зварних з'єднань сплавів E110-ГФЕ-1, VT1-ГФЕ-1, E110-E110 та VT1-VT1. Встановлені залежності ширини шва та глибини провару оболонки від величини погонної енергії при електродуговому зварюванні виробів у середовищі гелію, а також режими, що забезпечують одержання якісних з'єднань. Представлені результати металографічних досліджень матеріалів зварених швів.

WELDED JOINT IN ADVANCED ABSORBER ELEMENTS OF POWER REACTORS

M.M. Belash, I.A. Chernov, V.R. Tatarinov, E.A. Slabospitska, A.B. Kushtym

The paper considers various welded joints used in advanced absorber rod designs with a combined absorber material for WWER-1000 RCCAs and provides the results of research into formation of welded joints for the alloys E110-HFE-1, VT1-HFE-1, E110-E110 and VT1-VT1. The dependences of the joint width and weld penetration on the heat input during electric arc welding of samples in helium, as well as the modes that ensure high-quality welded joints have been determined. The paper also presents the results of the metallographic research into welded joint materials.