

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ ПРИПОЕВ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ ПАЙКИ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ АТОМНОЙ ТЕХНИКИ

*Б.А. Калинин, В.Т. Федотов, О.Н. Севрюков, Т.Т. Мамедова, *Б.В. Рыбкин, **
А.В. Иванов, **С.Н. Тимошин, Московский инженерно-физический институт,
(государственный университет), г. Москва;*

**Государственный научный центр Российской Федерации «Физико-энергетический
институт им. А.И. Лейпунского», г. Обнинск;*

***ОАО «Машиностроительный завод», г. Москва, Россия*

Применительно к пайке изделий из сплавов циркония, переходников «цирконий-сталь», «титан-сталь» разработаны и изготовлены аморфные ленточные припои по технологии быстрой закалки расплава. На основе физико-химического анализа многокомпонентных сплавов циркония и титана выбраны для аморфизации композиции в системе сплавов Zr - Fe - Nb - Be - Cu и Ti-Cu-Zr-Ni-Be-V с температурами плавления в интервале 750...850°C. Разработана технология производства особо тонкой быстрозакаленной ленты сплавов и отработаны режимы вакуумной инерционной и быстрой пайки сплавов Э110, сплавов циркония Э110 и титана ВТ-5 со сталью Х18Н10Т. Изучено строение зоны пайки и проведены комплексные исследования паяных соединений ячеек циркониевых дистанционирующих решеток (ЦДР) ТВС РБМК и ВВЭР-440, переходников «цирконий (Э110)–сталь (Х18Н10Т)», «титан (ВТ-5)–сталь (Х18Н10Т)», включая коррозионные испытания в автоклавах, работоспособность при механическом нагружении, упругие характеристики и др.

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатационная надежность твэлов и других внутриреакторных устройств во многом определяется качеством соединения конструктивных элементов, обеспечивающих герметизацию твэлов, точное их дистанционирование в ТВС и ТВС в активной зоне. Наиболее распространенной технологией для соединения элементов различных конструкций является сварка: газодуговая, лазерная, электронно-лучевая, контактно-точечная, контактно-шовная, контактно-стыковая (КСС), магнитно-импульсная и диффузионная [1,2], а также пайка высокотемпературными припоями [3]. Преимущественное использование сварки обусловлено такими достоинствами, как высокая скорость процесса и его автоматизация, обеспечение сплошности, размера и формы изделий, норм герметичности, высокой коррозионной стойкости и прочностных характеристик соединений. Однако качество сварки в значительной степени зависит от элементного и фазового составов соединяемых материалов, однородности их структуры и качества технологии получения. При отклонении от технологических требований при сварке могут наблюдаться непровары и трещины в зоне шва и в зоне термического влияния, поры, газовые каналы (свищи, вздутия) и другие дефекты [1, 2].

Особенно сложным обеспечение качества соединений становится при сварке дисперсно-упрочненных материалов, имеющих сложную температурную зависимость пластических характеристик [4], а также при сварке разнородных материалов, переходников разнородных металлов. Лидирующей технологией при производстве переходников, например, «сталь–титан» и «сталь–цирконий» является метод сварки в твердой фазе (ударом, взрывом, совмест-

ным прессованием, экструзией и т. д.). К существенным недостаткам сварки в твердой фазе переходников, включая диффузионную сварку, можно отнести достаточно сложную технологию, требующую специального производственного оборудования. Для получения надежного соединения необходимо иметь большие развитые площади контакта сопрягаемых деталей и т. д.

При контактно-стыковой сварке ЦДР требуется определенная ширина контактной зоны ячеек, равная не менее диаметра электрода. Это накладывает ограничение на конструктивное совершенствование существующих ячеек ЦДР РБМК и ВВЭР. Кроме того, существующая технология КСС не обеспечивает необходимой жесткости ЦДР, например, ТВС ВВЭР-1000 принимают куполообразную форму. Наличие щелевой коррозии и случаи разрушения ЦДР ТВС РБМК-1000 в определенной степени связаны с особенностями технологии сварки (зазоры, зона термического влияния, остаточные напряжения).

В то же время необходимость повышения степени выгорания топлива и обеспечения безопасности ядерных реакторов требуют совершенствования технологии соединения деталей активной зоны реакторов. В этой связи заслуживает внимание вакуумная (безфлюсовая) пайка конструктивных элементов ТВС, переходников разнородных металлов [3, 5-19].

Пайка имеет ряд значительных преимуществ перед сваркой благодаря возможности соединять детали без расплавления основного металла, без нарушения геометрических размеров изделия, без зон гетерогенных структурно-фазовых состояний; формированию соединения практически одновременно по всем поверхностям контакта, а не последовательно, как при сварке; получению (формированию) качественного физического шва при соединении дета-

лей в различных пространственных положениях; возможности совмещения операций пайки и термической обработки при использовании одного и того же нагревательного оборудования [6, 8, 10].

К недостаткам пайки можно отнести загрязнение паяных швов в случае использования флюсов; развитие ликвационных процессов и пористости при использовании припоев с широким интервалом кристаллизации; образование и рост хрупких интерметаллидных фаз при пайке разнородных материалов и рост зерна в основном металле вследствие длительности процесса пайки; ограниченность выбора сплавов-припоев, совместимых с паяемыми материалами и отвечающих требованиям последующей эксплуатации паяного соединения [5]. В целом используемые сегодня припой обладают рядом недостатков, связанных как с их химическим составом, так и с формой применения. В связи с этим весьма перспективными представляются новые высокотемпературные ленточные припои, полученные в аморфном или микрокристаллическом состоянии методом быстрого затвердевания расплава, и обладающие рядом уникальных свойств. Назовем их быстрозакаленными припоями (БЗП) [6,8,10].

Целью настоящей работы является обсуждение результатов разработки и применения быстрозакаленных ленточных припоев для высокотемпературной вакуумной пайки сплавов циркония на примере ЦДР, пайки разнородных сплавов для внутриреакторных устройств.

1. БЫСТРО ЗАКАЛЕННЫЕ ПРИПОИ

Положительными характеристиками БЗП являются высокая химическая и фазовая однородность, достигаемые вследствие фиксации в твердом состоянии жидко подобной аморфной структуры или формирования микрокристаллической (нанокристаллической) структуры [6]. При закалке металлических расплавов со скоростями $10^4 \dots 10^6 \text{K/c}$ фиксируют состояние пересыщенного твердого раствора ($\alpha_t \approx \alpha_{\text{ж}} > \alpha_{\text{равн}}$); гомогенное по объему распределение легирующих компонентов, подобное распределению в расплаве, созданном индукционной плавкой. Кластерное строение (распределение по размерам и объемная доля) в аморфных БЗП регулируется перегревом расплава. При производстве БЗП получают калиброванную гибкую ленту толщиной 20...100 мкм и шириной 2...50 мм. После размола предварительно термообработанной ленты можно получать микропорошки.

Физико-химические качества БЗП обуславливают значительно более высокую диффузионную [19] и капиллярную [5, 19, 21] активность по сравнению с кристаллическими аналогами, а также превосходную гибкость. Быстрое затвердевание сужает интервалы плавления и кристаллизации, что в сочетании с малой толщиной (20...50 мкм) обеспечивает «мгновенное» равномерное плавление припоя по всему объему [5]. Аморфность структуры означает также

идентичность физико-химических свойств произвольно взятого участка ленты из любой партии сплава-припоя (при условии, конечно, одинаковости химического состава исходного сплава), что, в свою очередь, означает непрерывность и однородность сколь угодно большого по площади паяного соединения.

К числу положительных эффектов применения БЗП можно отнести и тот факт, что при оптимальном термическом цикле пайки (~30 мин при $T > 700^\circ$) вследствие высокой химической однородности припоя, узкого температурного интервала плавления, равномерного плавления припоя по объему, хорошей смачиваемости поверхности, высокой капиллярной и диффузионной активности компонентов расплавленного припоя в паяном шве отсутствуют интерметаллиды даже при пайке таких металлов, как Be-Cu [9,16]. Важно, что применение БЗП часто не требует дополнительной обработки паяемых поверхностей металлов. Для полной реализации свойств, заложенных в структурном состоянии БЗП можно широко варьировать скоростями нагрева и охлаждения паяемой сборки.

Мотивация внедрения пайки для изготовления ЦДР подкреплена двумя причинами. Во-первых, под сварку требуется определенная ширина контактной площади ячеек, что ограничивает возможность изменения формы ячеек ЦДР (пуклевки), необходим отжиг готовых ЦДР для снятия напряжений от сварки. Во-вторых, увеличение выгорания топлива и продление кампании до 6 лет обязывает искать новые способы соединения деталей твэлов и ТВС и, возможно, повышения жесткости решетки.

Применение пайки для производства переходников в силу своих специфических особенностей позволяет значительно снизить трудозатраты. Основной сложностью является выбор припоев, совместимых (не образующих легкоплавких эвтектик при пайке, обладающих температурой пайки выше температур фазового перехода у сплавов титана или циркония и т.д.) с парами соединяемых материалов.

Опыт применения БЗП для пайки внутриреакторных устройств опубликован нами на межотраслевых конференциях по реакторному материаловедению [14, 17 - 19].

2. ОПЫТ ПАЙКИ СПЛАВОВ ЦИРКОНИЯ

Обширный опыт разработки припоев для пайки циркониевых сплавов и изделий из них, например, дистанционирующих решеток, обобщен в известной монографии [3]. Проведены испытания припоев на основе Au, Ag, Pd с добавками Cu, Ni, Mn, Co, Be. Большинство этих припоев продемонстрировало значительное взаимодействие с цирконием с образованием соответствующих фаз. Для снижения физико-химического взаимодействия были использованы добавки в припой Zr или применены припои на основе циркония: Zr-Ni-Mn-Ag-B, Zr-Be-Sn. По комплексу механических свойств и коррозионной стойкости лучшими бинарными припоями, по мнению авторов [3], являются бинарные сплавы Zr-50%

Ag, Zr-29% Mn и Zr-24% Sn. Применительно к пайке дистанционирующих решеток лучшим припоем по результатам длительных коррозионных (гидродинамических) испытаний и механическим свойствам является пятикомпонентный сплав на основе циркония: (80-91)% Zr - (5,5-15)% Fe - 1,5 % Ge - (1-3) % Cr - 2,5 % Be [3]. Температура плавления этих припоев находится в интервале 930...1020 °С, а температура пайки составляла 960...1030 °С. Это весьма высокая температура для сплавов циркония и поэтому в процессе пайки наблюдали рост зерна основного металла с 7-8 баллов до 5-6 [3].

Нами, на основании анализа диаграмм состояния и литературы [20], выбран состав сплава-припоя Zr - 8% Fe - 8% Nb - 2,2 % Be, произведены образцы аморфной ленты с интервалом плавления 815...865° С, отработан режим вакуумной пайки образцов сплава Э125 и проведены испытания паяных образцов [14]. Коррозионные испытания в дистиллированной воде при температуре 350°С давления 18 МПа в течение 100 ч показали удовлетворительную коррозионную стойкость паяных образцов. Было показано, что температура распайки превышает 1500 °С. На основании обобщения известного опыта пайки сплавов циркония сформулированы требования к составу и характеристикам припоя [14]. Легирующие компоненты припоя должны иметь небольшое сечение захвата тепловых нейтронов, понижать температуру плавления сплава, обеспечивать его аморфизацию, жидкотекучесть. Припой, в конечном итоге, должен обеспечивать температуру пайки ниже температуры $\alpha \leftrightarrow \beta$ превращения сплава (циркония, титана) и ниже температуры образования эвтектик с компонентами паяемых материалов (стали), иметь температуру распайки не ниже 1200°С (условие стабильности при полной потере теплоносителя – аварии типа LOCA - Loss of Coolant Accident), обеспечивать коррозионную стойкость спая и не ухудшать коррозионные и прочностные свойства основного материала, обеспечивать механическую надежность изделия.

3. РАЗРАБОТКА ПРИПОЯ ДЛЯ ПАЙКИ ЦДР ТВС ВВЭР-440

3.1. ВЫБОР СОСТАВА ПРИПОЯ

Стартовым составом был выбран припой на основе циркония Zr- 5.5 Fe-2.5Be - 1Nb с температурой солидуса $T_s=815-820^\circ\text{C}$ [14]. Введение в цирконий Fe совместно с Be повышает аморфизуемость сплава, повышает прочность (до 380...400 МПа), не ухудшает коррозионные свойства циркониевых сплавов. Be снижает температуру плавления и повышает жидкотекучесть. Nb стабилизирует коррозионную стойкость, устраняет вредное влияние углерода и других примесей, снижает долю поглощенного водорода [18]. С помощью дифференциально-термического анализа сплава [18], полученного в виде быстрозакаленной ленты толщиной 40...55 мкм, была выбрана температура пайки, равная 850...900°С. Методом вакуумной пайки были

спаяны ячейки ЦДР ТВС ВВЭР-440 и проведены их механические испытания. Усилие до отрыва паяных образцов с использованием аморфных припоев лежит в пределах 52...59 кГс, что более чем в два раза превышает усилие на отрыв сварных соединений (20...26 кГс). Однако в процессе испытаний обнаружена низкая коррозионная стойкость металла ячеек без заметной коррозии в зоне пайки, что свидетельствовало о перегреве сплава Э110 в процессе пайки.

Для снижения температуры пайки в сплав ввели медь, а для нейтрализации влияния азота и примесей – олово и хром [20], до состава: Zr- 5.5 Fe-2.5Be - 1Nb- Cu - Sn - Cr. Таким образом температуру пайки удалось снизить до 780°С. Для испытаний паяных образцов разработаны режимы печной инерционной и «быстрой», т.е. пайки с минимальной временной выдержкой при максимальной температуре, вакуумной пайки ячеек ЦДР из сплава Э110. В режиме «быстрой» вакуумной пайки (нагрев до 780°С, выдержка-пайка 60...80 с, последующие охлаждение до 580 °С и выдержка 6 ч при этой температуре) изготовлена партия парных соединений ячеек ЦДР ТВС ВВЭР-440. Паяные фрагменты были испытаны на коррозию, на отрыв и образование гидридов в ЦНИЛ ОАО «Машзавод».

Продолжительность коррозионных испытаний в дистиллированной пароводяной смеси при температуре 350°С и давлении 16,5 МПа составляла 6500 ч с промежуточными осмотрами при 72, 200, 500, 1000, 2000, 3000 и 5000 ч. При продолжительности испытаний 3000 ч толщина оксидной плёнки в галтельном участке паяного соединения, имеющем контакт с водой, составляет 6...8 мкм, в около шовной зоне — 4 мкм, на остальной поверхности — 3 мкм. Анализ микроструктуры паяной зоны после коррозионных испытаний в течение 1000 и 2000 ч показал (рис. 1 и 2), что присутствующие в паяной зоне гидриды, в отличие от сварной зоны, имеют преимущественно тангенциальную ориентацию, их размеры не велики.

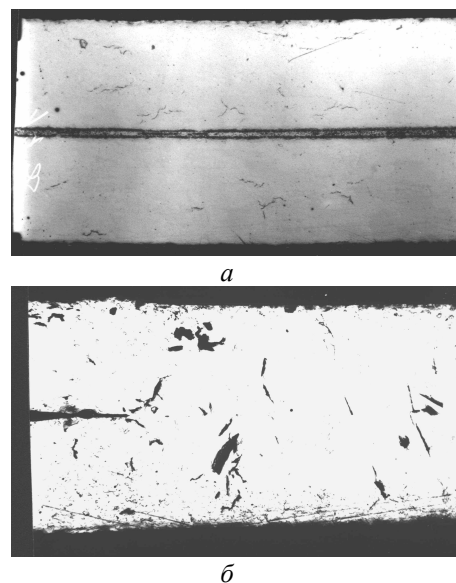


Рис. 1. Изображения гидридов вблизи соединений элементов ЦДР пайкой (слева) и сваркой (справа)

ва) после коррозионных испытаний в течение 1000 ч: а – пайка, увеличение 100; б) сварка, увеличение 100

Возможно, что малое количество гидридов и их тангенциальная ориентация обусловлены блокированием диффузии водорода компонентами припоя, растворенными в зоне паяного соединения. Паяные образцы, изготовленные по методу «быстрой» пайки, в процессе коррозионных выдержек (после 1000 и 2000 ч) испытывали на отрыв и установили, что прочность соединений снижается в первые 1000 ч (усилие отрыва в исходном состоянии 40...43 кГс, после выдержки в автоклаве — 18-22кГс), а затем практически не изменялись до 2000 ч. Сварные соединения имели усилие отрыва 34...37 кГс в исходном состоянии и 19...22 кГс после 1000 ч выдержки в автоклаве.

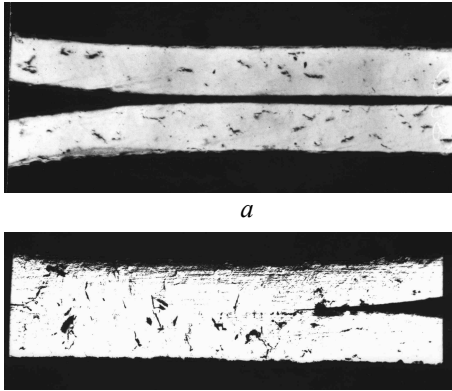


Рис. 2. Изображения гидридов вблизи соединений элементов ЦДР пайкой (слева) и сваркой (справа) после коррозионных испытаний в течение 2000 ч: а – пайка, увеличение 50; б – сварка, увеличение 50

После коррозионных испытаний 6000 и 6500 ч выявлено усиление коррозии галтели около шовной зоны в результате растрескивания и осыпания оксидной пленки, увеличение объемной доли и размера тангенциальных гидридов. После 6500 ч испытаний процесс коррозии значительно усиливается, глубина проникновения коррозионного фронта составит 350...400 мкм, и в данной зоне присутствуют значительные по размеру гидридные выделения.

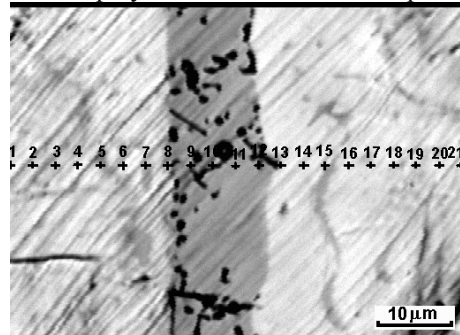
Для повышения коррозионной стойкости галтельного участка предприняты следующие шаги. Во-первых, снижена толщина припоя с 40 до 20 мкм. Во-вторых, снижена концентрация меди в припое до возможно минимального, с точки зрения температуры плавления припоя, уровня при увеличении концентрации бериллия для поддержания температуры пайки на уровне не более 780°C. Это потребовало отработать технологию производства особо тонкого (20 мкм) циркониевого припоя состава Zr- 5.5 Fe- 1Nb- Be -Cu - Sn - Cr.

3.2. ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИЕ РЕШЕТКИ И ИХ ИСПЫТАНИЯ

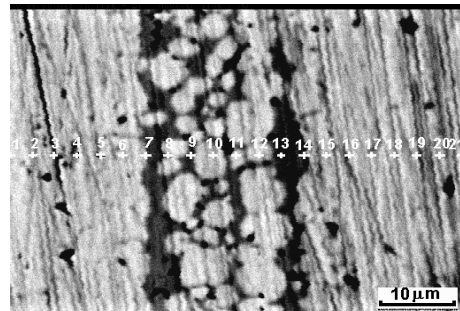
Микроструктурные исследования фрагментов ЦДР, полученных пайкой припоем Zr- 5.5 Fe- 1Nb-

Cu - Be - Sn - Cr толщиной 20 мкм, показали ряд положительных эффектов. Снижена толщина зоны пайки (рис. 3) и ширина галтели паяного шва (рис. 4) со 120 мкм (для припоя толщиной 40 мкм (см. рис. 4,б) до 30 мкм (см. рис. 4,а).

На рис. 3 показаны изображения микроструктур паяных швов, полученные в отраженных электронах на растровом электронном микроскопе «CamScan – 4DV». На рис. 3,а и 3,б можно различить три типа областей. 1-й — наиболее светлое поле, соответствует основному металлу, 2-й — более темная промежуточная по контрасту область соответствует областям, обогащенных железом и ниобием, 3-й — самый темный по контрасту участок это область, обогащенная железом, ниобием и бериллием. Сравнение рис. 3,а и 3,б позволяет видеть сокращение зоны паяного шва при уменьшении толщины припоя.

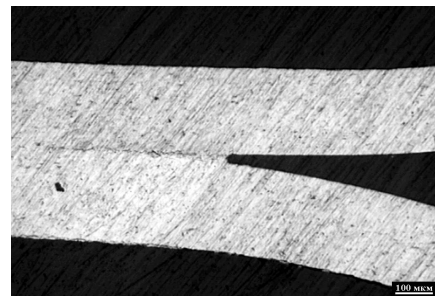


а X2000



б X2000

Рис. 3. Микроструктура паяного шва: а – толщина припоя 20 мкм; б – толщина припоя 40 мкм



а

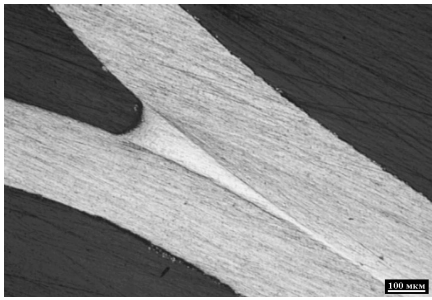


Рис. 4. Галтельный участок паяных швов:
а – толщина припоя 20 мкм; б – толщина припоя 40 мкм

Изготовлен полный комплект полномасштабных ЦДР ТВС ВВЭР-440 для виброиспытаний на ОАО МСЗ и определения усилий проталкивания твэлов. Величина зоны упругости дистанционирующих выступов ячеек ЦДР паяной конструкции составляет в среднем 0,14 мм, что соответствует зоне упругости дистанционирующих выступов ячеек штатных сварных ЦДР ВВЭР-440. Сравнительные испытания жесткости сварных и паяных ЦДР показали, что смещение центра паяной решетки (вдоль вертикали) при нагрузке 1,7 кГ в 1,5 раза меньше (200 мкм), чем сварной (330 мкм).

4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ ПРИПоеВ ДЛЯ ПАЙКИ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Переходники «цирконий – нержавеющая сталь» и «титан – нержавеющая сталь» являются важными узлами конструктивных элементов активных зон ЯЭУ и другой энергонапряженной техники. Поэтому в МИФИ и ФЭИ ведутся работы по созданию надежных переходников с помощью активной высокотемпературной вакуумной пайки. В качестве конструкции паяного соединения нами выбран телескопический тип спая с наружным расположением стальной детали. Возможен и конический тип спая тоже с наружным расположением стальной детали. С использованием аморфных БЗП разработаны технологии изготовления трубчатых переходников диаметрами от 5 до 70 мм. В настоящее время прорабатываются технологии изготовления переходников диаметром 100 мм и более.

Для пайки переходников «сталь–цирконий» выбран БЗП в аморфном состоянии состава Zr-Fe-Nb-Cu-Be-Sn-Cr. Для пайки переходников «сталь–титан» выбран БЗП в аморфном состоянии состава Ti-25Cu-12Zr-12Ni-1,5Be-0,8V. Пайка произведена в вакууме не хуже $6,5 \times 10^{-3}$ Па. Температура пайки для переходников «сталь–цирконий» — 850°C, для переходников «сталь–титан» — 870°C. Время выдержки при температуре пайки 3...5 мин. Возможна дополнительная термообработка.

Изготовленные переходники прошли предварительные испытания на прочность соединения в условиях различных схем нагружения и нагревания и ускоренные коррозионные испытания.

Переходники «сталь–титан» диаметром 35 мм (толщина стенки 2,5 мм.) и «сталь–цирконий» диаметр 16 мм (толщина стенки 2 мм.) испытаны, во-первых, на герметичность в условиях нагревания в интервале температур от 20 до 720°C под действием наружного давления газа величиной 60 атм на базе 10 термоциклов. Во-вторых, испытаны внутренним газовым давлением величиной, вызывающей напряжения в конструкции переходника величиной 0,7; 0,8 и 0,9 предела текучести титана и циркония в температурном интервале 20...700°C. В третьих, прошли термоциклические испытания в вакууме в температурном интервале 150...650...150°C со скоростями нагрева и охлаждения 200...250°C/мин. Количество циклов — 100.

Переходники «сталь–титан» испытаны на воздухе в режиме термоциклирования в интервале температур от 20 до 510°C со скоростью нагревания 350°C/мин (муфельная печь) и скоростью охлаждения 200°C/с (вода) на базе 50 циклов. Во всех случаях испытаний нарушения вакуумной плотности соединений не установлено. Более того, визуальный осмотр и металлографический анализ зоны пайки подтвердили отсутствие каких-либо разрушений переходников или заметной коррозии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена оптимизация состава сплава–припоя на основе циркония (Zr-Fe-Nb-Cu-Be-Sn-Cr) и разработана технология производства особо тонкого (20 мкм) ленточного быстрозакаленного припоя для пайки сплавов циркония при температуре до 780°C.

Разработаны методы печной инерционной и «быстрой» вакуумной пайки циркониевым припоем фрагментов и полномасштабных циркониевых дистанционирующих решеток ТВС ВВЭР-440, и трубчатых (диаметром 5...70 мм) переходников «сплав Э110–сталь X18H10T». Предварительные коррозионные и механические испытания паяных изделий показали их высокую работоспособность в воде реакторных параметров.

Разработан состав, метод получения и произведен быстрозакаленный ленточный припой на основе титана (Ti-Cu-Zr-Ni-Be-V). Разработан метод печной вакуумной пайки переходников «сплав ВТ-5–сталь X18H10T» с высокой работоспособностью в условиях термоциклирования под нагрузкой.

Начаты внутривакуумные испытания паяных фрагментов ЦДР ТВС ВВЭР.

Освоение технологии пайки проводится на ЦДР, разработанных под контактно-стыковую сварку. Для наиболее полного использования преимуществ пайки при больших выгораниях топлива необходима новая конструкция ЦДР.

Работа выполнена при поддержке ОАО ТВЭЛ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов /Ф.Г. Решетников, Ю.К. Бибилашвили, И.С. Голов-

- нин и др. /Под. ред. Ф.Г. Решетникова. В 2 кн. Кн. 2. М.: «Энергоатомиздат», 1995, 336 с.
- 2.А.Г. Самойлов, В.С. Волков, М.И. Солонин. *Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов*: Учебник для вузов. М.: «Энергоатомиздат», 1996, 400 с.
- 3.И.Д. Понимаш, А.В. Орлов, Б.В. Рыбкин. *Вакуумная пайка реакторных материалов*. М.: «Энергоатомиздат», 1995, 192 с.
- 4.Н.М. Бескоровайный, Б.А. Калинин, П.А. Платонов, И.И. Чернов. *Конструкционные материалы ядерных реакторов*: Учебник для вузов. М.: «Энергоатомиздат», 1995, 704 с.
- 5.N.J. De Christofaro, A. Datta. Rapidly Solidified Filler Metals in Brazing and Soldering Applications // *Rapidly Quenched Metals*. 1985, p. 1715–1721.
- 6.Б.А. Калинин, В.Т. Федотов, О.Н. Севрюков и др. Аморфные ленточные припои для высокотемпературной пайки. Опыт разработки технологии производства и применения // *Сварочное производство*. 1996, № 1, с. 15–19.
- 7.Б.А. Калинин, В.Т. Федотов, О.Н. Севрюков, А.Е. Григорьев, Л.А. Скуратов, А.Н. Плющев, В.В. Чурак Применение аморфного ленточного припоя СТЕМЕТ 1101 для бесфлюсовой пайки меди // *Инженер*. 1996, ч. 1, с. 282–283.
- 8.В.А. Kalin, V.T. Fedotov, O.N. Sevryukov et al. Amorphous strip brazing alloys for high-temperature brazing // *Welding International*. 1996, v. 10(7), p. 578–581.
- 9.Б.А. Калинин, О.Н. Севрюков, В.Т. Федотов, А.Е. Григорьев, Ю.Н. Калинин. Пайка тонкостенных конструкций из титановых сплавов аморфными припоями марки СТЕМЕТ // *Сварочное производство*. 1996, №9, с. 23–24.
- 10.Б.А. Калинин, В.Т. Федотов, О.Н. Севрюков и др. Разработка и применение аморфных ленточных припоев в авиационно-космической технике // *Перспективные материалы*. 1996, № 6, с. 21–24.
- 11.В.С. Odegard, В.А. Kalin. A Review of the Joining Techniques for Plasma Facing Components in Fusion Reactor // *J. Nucl. Mater.* 1996, v. 233-237, p. 44–50.
- 12.В.А. Kalin, V.T. Fedotov, A.E. Grigoryev et al. Application of Amorphous Filler Metals in Production of Fusion Reactor High Heat Flux Components // *Fusion Engineering and Design*. 1995, v. 28, p. 119–124.
- 13.В.А. Kalin, V.T. Fedotov, O.N. Sevryukov et al. Application of Amorphous and Microcrystalline Filler Metals for Brazing of Beryllium with Metals // *J. Nucl. Mater.* 1996, v. 233-237, p. 945–948.
- 14.Б.А. Калинин, В.Т. Федотов, О.Н. Севрюков и др. Быстрозакаленные аморфные и микрокристаллические припои для ядерной энергетики // *Сборник докладов 4-й межотраслевой конференции по реакторному материаловедению*. (Дмитровград, 15-19 мая 1995 г.) В 4-х томах. т. 3. Дмитровград, 1996, с. 315–330.
- 15.Б.А. Калинин, В.Т. Федотов, О.Н. Севрюков. Аморфные металлические сплавы // *Изобретатели – машиностроению*. 1997, т. 2 с. 27–29.
- 16.В.А. Kalin, V.T. Fedotov, O.N. Sevryukov et al. Brazing thin sheet structures of titanium alloys using СТЕМЕТ amorphous brazing alloys // *Welding International*. 1997, v. 11 (6), p. 234–235.
- 17.Б.А. Калинин, О.Н. Севрюков, А.Н. Плющев, В.Т. Федотов, В.В. Осипов. Разработка ленточных аморфных припоев для пайки циркониевых сплавов // *Сб. докл. V Межотраслевой конференции по реакторному материаловедению* (Дмитровград, 8-12 сентября 1997 г.). Дмитровград, 1998, т. 2, ч. 1, с. 226–244.
- 18.Б.А. Калинин, В.Т. Федотов, О.Н. Севрюков, А.Н. Плющев, Т.Т. Мамедова, С.Н. Тимошин, Е.Ф. Шестаков. Разработка аморфного ленточного припоя для пайки дистанционирующих решеток // *Сб. докл. V Межотраслевой конференции по реакторному материаловедению* (Дмитровград, 8-12 сентября 1997 г.) 1998, Дмитровград, т. 3., ч. 2, с. 254–267.
- 19.Б.А. Калинин, В.Т. Федотов, О.Н. Севрюков, А.Н. Плющев, Т.Т. Мамедова. Особенности активной высокотемпературной пайки изделий атомной техники быстрозакаленными припоями // *Сб. докл. VI российской конференции по реакторному материаловедению* (г. Дмитровград, 11-15 сентября 2000 г.) в 3-х т. Дмитровград, 2001, т. 3., ч.2, с. 103–114.
- 20.А.С. Займовский, А.В. Никулина, Н.Г. Решетников. *Циркониевые сплавы в ядерной энергетике*. М.: «Энергоатомиздат», 1994, 256 с.
- 21.К. Судзуки, Х. Фудзимори, К. Хасимото. *Аморфные металлы*. М.: «Металлургия», 1987, 328 с.

РОЗРОБКА Й ЗАСТОСУВАННЯ ШВИДКОЗАГАРТОВАНИХ ПРИПОЇВ ДЛЯ ПРЕЦИЗІЙНОЇ ПАЙКИ РІЗНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ АТОМНОЇ ТЕХНІКИ

**Б.О. Калін, В.Т. Федотов, О.Н. Севрюков, Т.Т. Мамедова,
Б.В. Рыбкин, А.В. Иванов, С.Н. Тимошин**

Стосовно до пайки виробів зі сплавів цирконію, переходників «цирконій-сталь», «титан-сталь» розроблені й виготовлені аморфні стрічкові припої за технологією швидкого загартовування розплаву. На основі фізико-хімічного аналізу багатокомпонентних сплавів цирконію й титану обрані для аморфизації композиції в системі сплавів Zr - Fe - Nb - Be - Cu і Ni-Be-V з температурами плавлення в інтервалі 750...850(С. Розроблена технологія виробництва особливо тонкої швидкозагартованої стрічки сплавів і відпрацьовані режими вакуумної інерційної й швидкої пайки сплавів E110, сплавів цирконію E110 і титану ВТ-5 зі сталлю Х18Н10Т. Вивчена будова зони пайки й проведені комплексні дослідження паяних сполук осередків цирконієвих дистанційних решіток (ЦДР) ТВС РБМК і ВВЭР-440, переходників «цирконій (E110)–сталь (Х18Н10Т)», «титан (ВТ-5)–сталь (Х18Н10Т)», включаючи корозійні випробування в автоклавах, працездатність при механічному навантаженні, пружні характеристики й ін.

DEVELOPMENT AND USE OF HARDENED SOLDERS

**FOR PRECISION SOLDERING OF HETEROGENEOUS MATERIALS FOR NUCLEAR
TECHNIQUE]**

*B.A. Kalin, V.T. Fedotov, O.N. Sevryukov, T.T. Maamedova,
B.V. Ribkin, A.V. Ivanov, S.N. Timoshin*

Amorphous ribbon solder are developed and fabricated by the melt hardening for the soldering of zirconium alloys, adapters "zirconium-steel", "titanium-steel". On the base of physical-chemical analysis of multi-components alloys of zirconium and titanium compositions for amorphization are selected in the system of alloys Zr-Fe-Nb-Cu and Ti-Cu-Zr-Ni-Be-V with melting temperatures in the range 750...850°C. Fabrication methods are developed for production of particularly fine hardened ribbon of alloys; conditions of vacuum inertia and fast brazing of alloys E110, alloys of zirconium E110 and titanium BT-5 with steel 18Cr10NiT are tried out. Structure of brazing zone is studied, complex investigation of brazed joints of distance grids for fuel assemblies of FBR and VVER-440 are carried out; transducers "zirconium (E110)-steel (18Cr10NiT)", "titanium (BT-5)-steel (18Cr10NiT)" were investigated including autoclave testing, performances under mechanical loads, elastic characteristics etc.