На правах рукописи

Сучков Алексей Николаевич

РАЗРАБОТКА БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ ЛЕНТОЧНЫХ ПРИПОЕВ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПАЙКИ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Автор:

Москва – 2011

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «Московский инженерно-физический институт»

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: доктор физико-математических наук, профессор Калин Б.А., НИЯУ МИФИ

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОПОНЕНТЫ: Доктор технических наук
Пашков И.Н., профессор кафедры
“Технологии литейных процессов”
НИТУ МИСиС

Кандидат физико-математических наук
Волков А.А., начальник лаборатории
“Ионных систем”
НИЦ “Курчатовский институт”

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ»

Защита состоится «29 » июня 2011 г. в 17 час. 00 мин.
на заседании диссертационного совета Д 212.130.04 НИЯУ МИФИ
по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан « 26 » мая 2011 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенном печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь диссертационного совета
НИЯУ МИФИ, д.ф.-м.н., профессор И.И. Чернов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Изготовление энергонапряженных узлов ядерной и термоядерной техники является сложной технологической задачей. Множество проблем возникает в процессе сборки отдельных компонентов друг с другом в конечный конструктивный элемент. Из методов получения неразъемных соединений, широко применяемых во многих отраслях промышленности, существенное развитие получили сварка и пайка, причем каждая технология имеет свою область применения. При изготовлении диверторного модуля реактора ИТЭР (международный экспериментальный термоядерный реактор) и коллекторного узла ЭГК (электрогенерирующий канал) ядерного ректора космического базирования наиболее оптимальной и реализуемой технологией соединения элементов является высокотемпературная пайка. Данный метод реализуется при температурах существенно меньших, чем при сварке, что вызывает меньшее термическое влияние на соединяемые материалы, и за один технологический цикл появляется возможность реализовать множество соединений, что делает данный процесс наиболее технологичным.

В последнее время стали широко использовать быстрозакаленные припои (БЗП) в виде лент толщиной 20…80 мкм. Такие припои получают технологией сверхбыстрой закалки расплава на вращающемся диске-холодильнике со скоростью 10^4…10^6 К/с. Высокая скорость охлаждения позволяет при комнатной температуре получать припои со структурой переохлажденной жидкости, в состоянии пересыщенного твердого раствора с равномерным распределением компонентов сплава по всему объему, что определяет уникальные свойства (смачиваемость, капиллярная активность и др.) припоя в процесс расплавления и взаимодействия расплава с паяемыми материалами.

Технология сверхбыстрой закалки дает возможность получать из труднодеформируемых слитков удобные в обращении гибкие ленты, которые обладают целым комплексом преимуществ перед своими кристаллическими аналогами, полученными традиционными методами: они имеют однородное фазовое состояние по всему объему, характеризуются узкими интервалами плавления и затвердевания, высокой адгезионной и капиллярной активностью. Все это позволяет повысить качество пайки, уменьшить количество дефектов паяных соединений, снизить количество интерметаллидов в зоне пайки.

Однако, на сегодняшний день недостаточно изучены физико-химические и технологические особенности как производства высокотемпературных БЗП, так и пайки тугоплавких металлов и сплавов. Существует необходимость оптимизации составов и потребность в разработке новых ленточных БЗП как для создания неразъемных соединений вольфрама, ниобия и других металлов между собой, так и с теплоотводящими металлами (сплавами) и получении припоев с заданной температурой плавления и четкими технологическими режимами пайки различных материалов.

Учитывая жесткие тепловые и радиационные условия эксплуатации ЭГК в ЯЭУ и дивертора в ИТЭР, характеризующиеся интенсивным термическим, корпускулярным и циклическим воздействием, к неразъемным соединениям, выполненным с помощью пайки, предъявляются серьезные требования по термомеханическому сопротивлению в условиях облучения.

Следует особо отметить, что в настоящий момент не решена проблема соединения компонентов облицовки диверторного модуля ИТЭР с теплоотводящей основой – бронзой (соединение “вольфрам–бронза”). Поэтому разработка припоя с низкой температурой плав-

ления, для сохранения заданного структурно-фазового состояния теплоотводящей бронзы в процессе пайки, компоненты которого не образуют химических соединений в зоне пайки, является актуальной задачей.

При изготовлении коллекторного пакета ЭГК многоканальных термоэмиссионных преобразователей (ТЭП) ЯЭУ космического базирования существует проблема заплавления технологических каналов в процессе пайки при использовании кристаллического припоя системы Pd-Ni. В этой связи актуальной является разработка припоя, позволяющего получить неразъемные соединения заданной формы, т.е. без заплавления технологических каналов.

Цель работы. Целью работы явилась разработка составов и технологии получения быстрозакаленных ленточных припоев и режимов высокотемпературной пайки тугоплавких металлов и сплавов применительно к созданию неразъемных соединений материалов современной энергонапряженной техники.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

- предложена методика выбора оптимального для данной пары паяемых материалов состава припоя;

- разработан состав нового припоя на основе системы Cu-Ti-Be для пайки фрагментов (тайлов) дивертора ИТЭРа в виде неразъемного соединении «вольфрам-бронза» и отработаны режимы пайки этого соединения;

- разработан состав нового припоя на основе систем Zr-Nb-Ni-Be и Zr-Nb-Ni-Fe для пайки фрагментов коллекторного пакета ЭГК многоканальных ТЭП ЯЭУ космического базирования в виде неразъемного соединении «ниобий-ниобий» и отработаны режимы пайки этого соединения;

-отработана технология изготовления наноструктурных ленточных припоев составов: Cu-28Ti-1Be, Zr-19Nb-15Ni, Zr-19Nb-15Ni-1Be, Zr-19Nb-7,5Ni-7,5Fe (мас.%) методом сверхбыстрой закалки расплава на медном диске – холодильнике и получены припои;

- исследованы структурно-фазовые состояния паяных соединений «вольфрам-бронза» и «ниобий-ниобий»;

-проведены механические испытания до и после нейтронного облучения соединений «вольфрам–бронза», спаянных ленточным БЗП на основе меди состава Cu-28Ti-1Be.

Научная новизна. На основе физико-химического анализа диаграмм состояния систем сплавов разработана методика выбора композиций быстрозакаленных сплавов-припоев для высокотемпературной пайки однородных и разнородных материалов.

Разработаны составы и технология получения сплавов-припоев на основе меди и циркония в виде гибких лент методом сверхбыстрой закалкой расплава.

Разработана технология и режимы пайки однородных и разнородных металлов и сплавов на основе меди, вольфрама и ниобия при различных температурах и временах выдержки.

Впервые установлено, что в зоне пайки вольфрама с медью за счет интенсивного растворения легирующих элементов припоя Cu-28Ti-1Be в меди формируется паяный шов без интерметаллидов, что обеспечивает отсутствие дефектов соединений и высокие термомеханические характеристики.

Впервые получены быстрозакаленные ленточные припои на основе циркония, обладающие повышенными капиллярными и адгезионными свойствами, эффективно заполняющие протяженные капиллярные зазоры между деталями из сплавов на основе ниобия.

Впервые путем сравнительных исследований по затеканию в коаксиальный зазор между цилиндрическими заготовками из сплава на основе ниобия быстрозакаленного Zr-Nb-Ni и кристаллического Pd-Ni припоев показано преимущество БЗП-припоя.

Получены новые данные по механическим испытаниям до и после нейтронного облучения соединения «вольфрам–бронза», спаянного ленточным БЗП на основе меди.

Практическая ценность

Разработаны составы и технология изготовления методом сверхбыстрой закалки из расплава новых ленточных БЗП Cu-28Ti-1Be, Zr-19Nb-15Ni, Zr-19Nb-15Ni-1Be, Zr-19Nb-7,5Ni-7,5Fe. Подобраны и отработаны режимы прецизионной пайки материалов современной техники: вольфрама с медными сплавами применительно к изготовлению тайлов дивертора реактора ИТЭР; сплавов на основе ниобия применительно к изготовлению коллекторного пакета ЭГК ЯЭУ космического базирования.

Припои Zr-19Nb-15Ni, Zr-19Nb-15Ni-1Be, Zr-19Nb-7,5Ni-7,5Fe использованы в ФГУП “НИИ НПО “ЛУЧ” (г. Подольск) для пайки макетов коллекторного пакета ЭГК космических ЯЭУ из сплава на основе ниобия НбЦ-1.

Припой Cu-28Ti-1Be использован в НТЦ «Синтез» ФГУП НИИЭФА им. Д.В. Ефремова (г. Санкт-Петербург) при разработке технологии пайки вольфрамовой облицовки к бронзовой основе для дивертора экспериментального термоядерного реактора ИТЭР.

Результаты практического применения подтверждены соответствующими актами внедрения.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Методика разработки быстрозакаленных ленточных припоев для пайки металлов и сплавов.

2. Составы быстрозакаленных ленточных припоев: Zr-19Nb-15Ni, Zr-19Nb-15Ni-1Be, Zr-19Nb-7,5Ni-7,5Fe и Cu-28Ti-1Be.

3. Технологические режимы пайки: соединения “вольфрам–бронза” припоем Cu-28Ti-1Be; сплавы на основе ниобия припоями Zr-19Nb-15Ni, Zr-19Nb-15Ni-1Be, Zr-19Nb-7,5Ni-7,5Fe.

4. Результаты исследований структурно-фазового состояния и механических свойств паяных соединений до и после нейтронного облучения.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов и библиографии. Работа изложена на 133 страницах, содержит 71 рисунок, 16 таблиц и список цитируемой литературы из 112 наименований.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались и обсуждались на следующих отраслевых, всероссийских и международных конференциях:

Научная сессия МИФИ (Москва, 2006, 2007, 2008, 2009); Научная сессия НИЯУ МИФИ (Москва, 2010, 2011); Евразийская конф. «Прочность неоднородных структур ПРОСТ-2006» (Москва, 2006); IV научно-практическая конференция материаловедческих обществ России «Новые градиентные и слоистые композиты» (Ершово, 2007); Всероссийский семинар «Пайка–2007» (Москва, 2007); Международная конф. «Пайка–2008» (Тольятти, 2008); Всероссийская конф. «Ядерное топливо нового поколения для АЭС: результаты разработки, опыт эксплуатации и направления развития» (Москва, 2009); XVII Международная конфе-

ренция по химической термодинамике в России «RCCT 2009» (Казань, 2009); Школа-семинар «Нанотехнологии – производству 2009» (Москва, 2009); Второй международный конкурс научных работ молодых ученых в области нанотехнологий. Международный форум по нанотехнологиям «Rusnanotech-09» (Москва, 2009); Международная конф. «Материалы ядерной техники МАЯТ-2010» (Туапсе, 2010); Международная конф. «Monaco ITER International Fusion Energy Days. First Joint IAEA-ITER Technical Meeting. Analysis of ITER Materials and Technologies » (Монако, 2010).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 25 работ, включая 6 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, и 1 патент на полезную модель.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность разработки быстрозакаленных припоев для пайки материалов энергонапряженных элементов международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР (дивертора) и ядерных энергетических установок космического базирования (коллекторного пакета электрогенерирующего канала); сформулированы цель работы и решаемые задачи, указаны новизна и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первый раздел представляет собой литературный обзор по пайке сплавов на основе меди, вольфрама и ниобия.

Во **втором разделе** приведены основные методики, разработанные и примененные автором для: получения припоев в виде кристаллических слитков и быстрозакаленных наноструктурированных лент; высокотемпературной пайки; исследования структурно-фазовых состояний полученных припоев; исследования структуры и свойств паяных соединений; испытаний полученных паяных соединений и макетных образцов.

В **третьем разделе** приведена методика выбора состава быстрозакаленного ленточного припоя для пайки однородных и разнородных материалов на основании физико-химического взаимодействия компонентов припоя с элементами паяемых материалов.

В **четвертом разделе** представлены результаты разработки аморфных быстрозакаленных ленточных сплавов-припоев для пайки вольфрама с бронзами различных классов применительно к изготовлению дивертора термоядерного реактора ИТЭР.

Жесткие режимы эксплуатации соединения вольфрама с теплоотводящей бронзой, включающие мощные тепловые и корпускулярные потоки со стороны плазмы, накладывают серьезные ограничения на состав и вид планируемых к применению припоев. На основании этого и в соответствии с предложенной методикой разработки быстрозакаленных припоев для пайки разнородных материалов и анализа литературных данных по пайке бронз и вольфрама за основу припоя была выбрана медь. Во-первых, это обусловлено тем, что медь является основой бронз, и в процессе пайки при взаимодействии расплава припоя с паяемым материалом произойдет минимальная эрозия поверхности основного металла. Во-вторых, медь не взаимодействует с вольфрамом ни в твердом, ни в жидком состояниях, что может гарантировать отсутствие интерметаллидов в паяном шве. В-третьих, представляется возможным получение аморфных лент на основе меди путем добавления в сплав эвтектикообразующих элементов, что также приведет и к снижению температуры плавления припоя.

Учитывая предложенные в методике варианты легирования основы припоя, был проведен комплексный анализ легирующих элементов, добавляемых в припои на основе меди, широко

применяемые в промышленности. Среди них можно выделить Ag, P, Zn, Sn, Mn, Ni, Ti, Zr, Cd, Ga, In, Si, Ge и др. Из-за ограничений применения ряда химических элементов в ИТЭР, связанных с обеспечением высокого вакуума (10^{-6}...10^{-7} Па) в камере, использование таких элементов как P, Cd, Zn, Mg и Pb недопустимо. Припои, содержащие серебро так же не применимы в условиях работы ИТЭР из-за образования под воздействием нейтронного облучения летучего трансмутантного кадмия. Оставшиеся элементы обладают удовлетворительными «летучими» характеристиками и применяются в качестве легирующих добавок в припоях на основе меди. Например, широко применяются припои систем Cu-Sn-Ni-Si, Cu-Sn-Mn, специально разработан припой для пайки Be–Cu системы Cu-Sn-In-Ni-Mn-P. Однако эти припои применяют либо в виде порошков, либо у них слишком высокие температуры и широкие интервалы плавления, а также в процессе пайки формируются структурно неоднородные швы, которые существенно ухудшают теплопередачу от экранного материала к теплоотводящей бронзе. Учитывая опыт применения припоев для пайки вольфрама, содержащих такие элементы как Ni, Ag, Au, Nb, Ti, Ta, Nb, Fe и др., целесообразно применять в качестве легирующих добавок элементы, образующие с вольфрамом твердые растворы и представляющие собой активные элементы, обеспечивающие наилучшие смачивание вольфрама и бронзы. С точки зрения совместимости легирующей добавки припоя на основе меди с вольфрамом и образования эвтектики с медью был выбран титан. Из диаграммы состояния Cu-Ti установлено, что в этой системе самой легкоплавкой ($T_{пл}$ = 887 °C) является эвтектика с содержанием 28%Ti и состоящая из фаз Cu_7Ti_3 ($T_{пл}$ = 905 °C) и Cu_7Ti ($T_{пл}$ = 908 °C). Титан обладает довольно большой растворимостью в меди при высоких температурах (до 6 мас.%). Наибольшая растворимость титана в меди имеет место при температуре 870 °C, что ниже температуры эвтектического превращения. Это может привести к тому, что в процессе пайки произойдет диффузионный отток атомов титана в бронзу с образованием твердого раствора. Взаимодействие Ti с вольфрамом происходит с образованием твердого раствора между β-Ti и W. Такое комплексное сочетание взаимодействия титана с вольфрамом (с образованием твердого раствора) и с медью (с образованием эвтектики и значительной растворимостью в меди) позволило заключить, что наиболее оптимальным является легирование припоя титаном в количестве 28%. С целью дальнейшего снижения температуры плавления припоя был проведен поиск легирующих элементов для дополнительного легирования. В качестве эффективного депрессанта в припоях на основе Ti удачно используют бериллий, низкое содержание которого (до 3%) существенно понижает температуру плавления сплавов. Растворимость Be в Cu при эвтектоидной температуре (600 °C) составляет 1,5%, а при температуре перитектического превращения (866 °C) – 2,7%. При содержании Be в количестве 2,6% температура плавления меди снижается на 120 °C и составляет около 960 °C. Однако, с целью предотвращения образования в паяном шве химических соединений с бериллием, и учитывая низкую растворимость Be в Ti, проведено дополнительное легирование системы Cu-28%Ti бериллием в количестве не более 1%.

Таким образом, в результате анализа диаграмм состояния систем сплавов Cu-Be и Be-Ti и с учетом опыта разработки и применения сплавов-припоев Cu-28Ti нами предложена новая модификация сплава в составе Cu-28Ti -1Be для пайки вольфрама с бронзой. Проведены сравнительные исследования обоих сплавов. Для этого в вакуумно-дуговой печи были выплавлены слитки, из которых методом быстрого затвердевания расплава на установке «Кристалл-702» получены припои в виде лент шириной 20 мм и толщиной 0,05 мм составов Cu-28Ti и Cu-28Ti -1Be. На рис. 1 приведены результаты дифференциального термического анализа (ДТА) полученных лент.

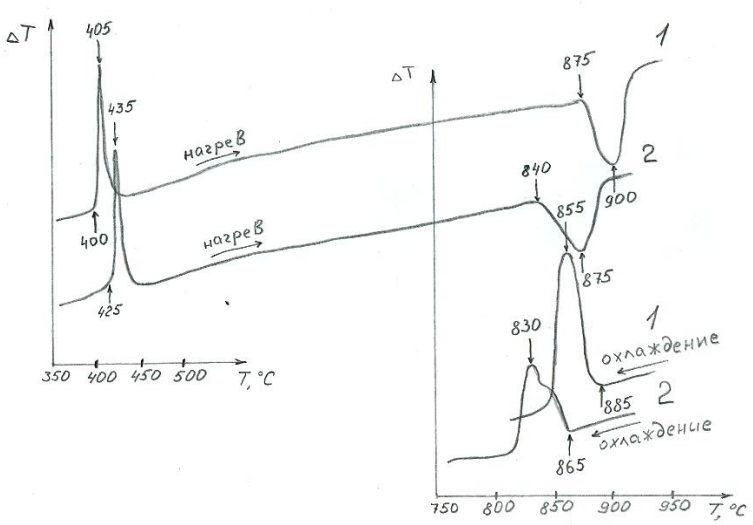


Рис. 1. Результаты высокотемпературного дифференциально-термического анализа быстрозакаленных сплавов Cu-28,0Ti (1) и Cu-28Ti-1Be (2) (скорость нагрева 20 град/мин, среда – гелий)

Как видно из кривых на рис. 1 экзотермические пики кристаллизации в интервале температур 400–405 ºС для сплава Cu-28Ti и 425–435 ºС для сплава Cu-28Ti-1Be свидетельствуют о том, что оба припоя в исходном состоянии имели аморфную структуру. Это предположение подтверждают результаты рентгеновской диффрактометрии (рис. 2), из которых следует, что спектры имеет ярко выраженное гало, свойственное рентгеноаморфным материалам. Из сравнения температур экзотермических пиков кристаллизации (рис. 1) установлено, что модифицированный бериллием сплав имеет более высокую температуру кристаллизации, что свидетельствует о более стабильной аморфной структуре этого сплава по сравнению со сплавом без бериллия. Температуры плавления составили 900 и 875 ºС для сплавов Cu-28Ti и Cu-28Ti-1Be, соответственно.

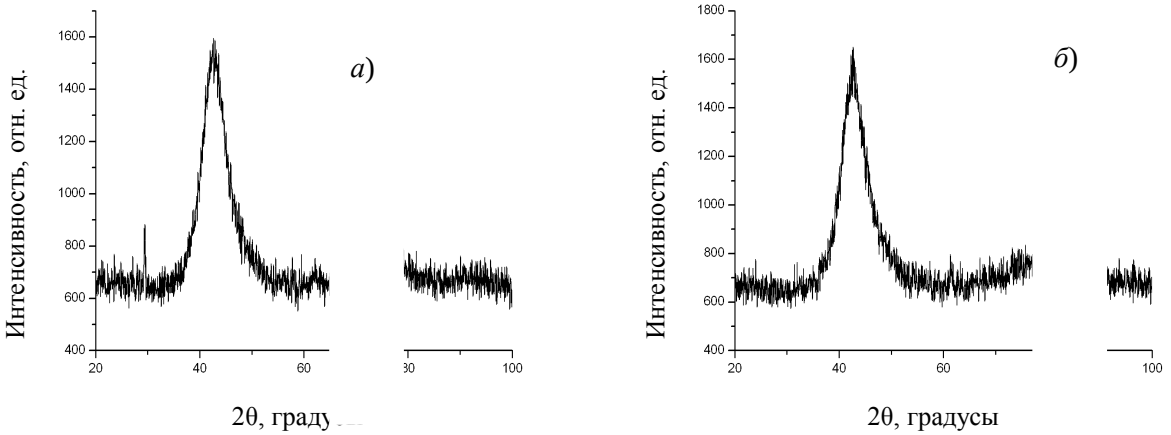
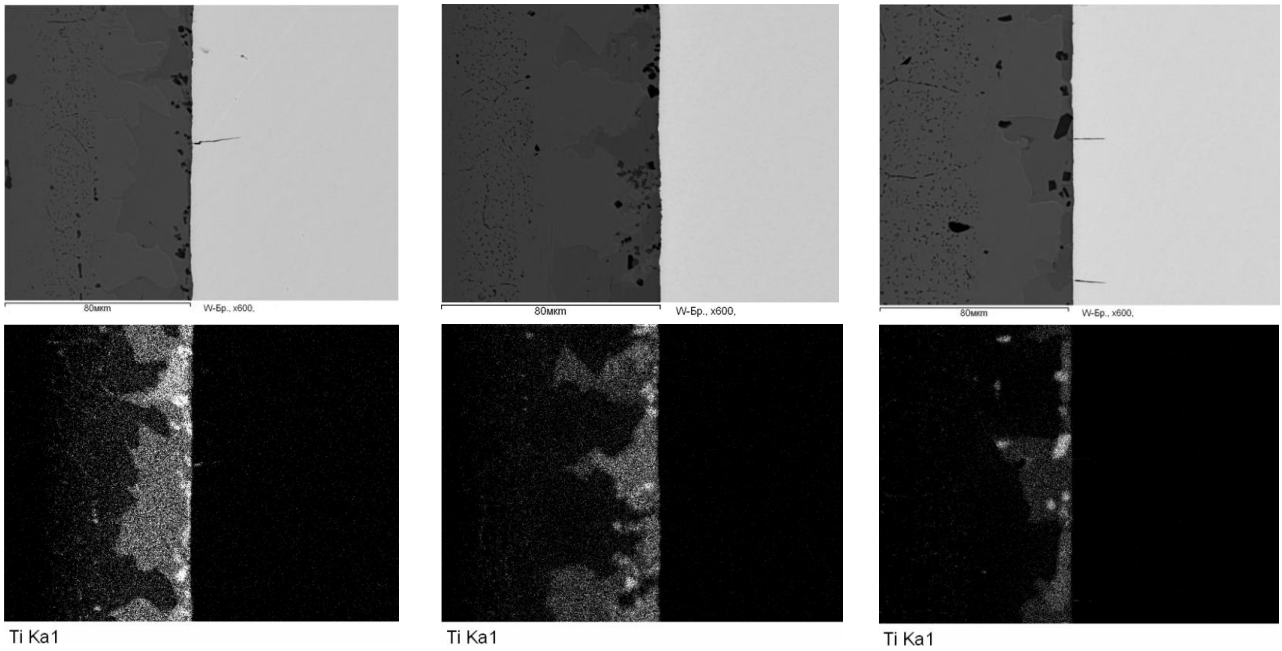


Рис. 2. Результ ой диффрактометрии быстрозака к припоев
авов: *а*) Cu-28Ti, *б*) Cu-28Ti-1Be

Для отра ческих режимов пайки в кач материалов ис-
пользовали воль аллический как кандидатный рана «домика»
дивертора ИТЭР нове меди различных марок: Б МАГТ. Среди
них наибольший интерес представляет хромо-ц за БрХЦр, от-
вечающая всем т плоотводящим материалам ди

Пайку образцов осуществляли в вакууме с остаточным давлением не хуже 10^{-5} мм.рт.ст. со скоростью нагрева 15–20 ^{o}C/мин и выдержкой при температуре пайки 900–950 ºС от 2 до 30 мин.

В результате металлографического анализа структур (рис. 3) и распределения элементов в зоне пайки W–БрНХК припоями Cu-Ti и Cu-Ti-Be установлено, что с увеличением времени выдержки при пайке происходит интенсивное растворение титана в бронзовой матрице и уменьшение его концентрации в паяном шве.



а) *б*) *в*)

Рис. 3. Микроструктуры (вверху) и распределение титана (внизу) в паяных соединениях W–БрНХК, припой Cu-Ti, T = 950 °C, выдержка: 2 (*а*), 10 (*б*), 30 мин (*в*) (слева – бронза, справа – вольфрам)

В процессе взаимодействия расплавленного припоя с бронзой происходит некоторое растворение последней, в результате чего в паяный шов попадают легирующие элементы из бронзы (Cr, Ni и Si). Из анализа результатов микрорентгеноспектральных данных установлена значительная активность кремния. В зоне шва были обнаружены выделения (соединения) типа Ti_mSi_n ограненной формы. Увеличение температуры и времени выдержки пайки сопровождается уменьшением концентрации этих выделений и увеличением их размеров. Содержание кремния и титана в этих образованиях достигает значений 15–23 и 33–64 % соответственно, что можно представить как соотношения 1:3 и 1:4. Из анализа диаграммы состояния Ti-Si установлено, что таким концентрационным соотношениям соответствует область гомогенности интерметаллида Ti_5Si_3 с максимальной температурой плавления 2130 °C и повышенной твердостью. Следует отметить, что процесс образования соединения тормозит диффузию титана в бронзовую матрицу и может привести к разрушению соединений в процессе термоциклических нагрузок. Наряду с этим в зоне пайки происходит незначительное растворение вольфрама (до 5%) при зоне взаимодействия 2–3 мкм. Вследствие этого можно говорить об отсутствии химической эрозии монокристаллического вольфрама.

Понижение температуры пайки припоем Cu-Ti-Be до 900 °C приводит к тому, что в зоне пайки не наблюдали образования соединений титана, но уже при выдержке 2 мин происходит заметное растворение титана (рис. 4). В этом случае паяный шов имеет незначи-

тельную ширину (около 10 мкм) при толщине ленты припоя 40 мкм. Это можно объяснить тем, что при 900 °С происходит незначительное растворение бронзы и, соответственно, переход в расплав небольшого количества легирующих элементов (в основном кремния) бронзовой подложки. Поэтому титан, содержащийся в припое, не связывается в соединения, а диффундирует в бронзовую матрицу.

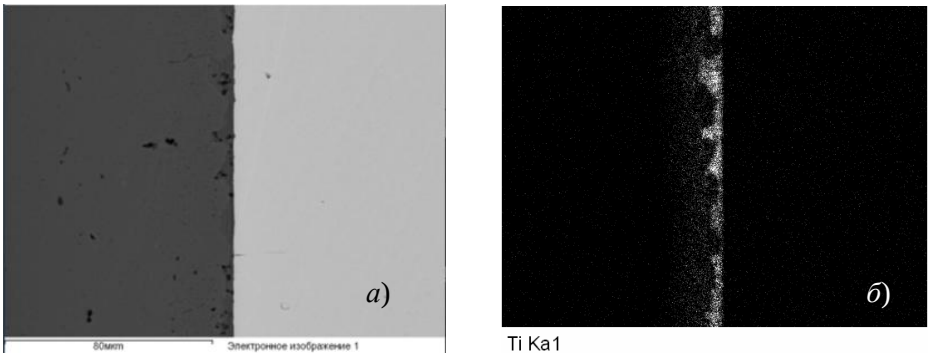
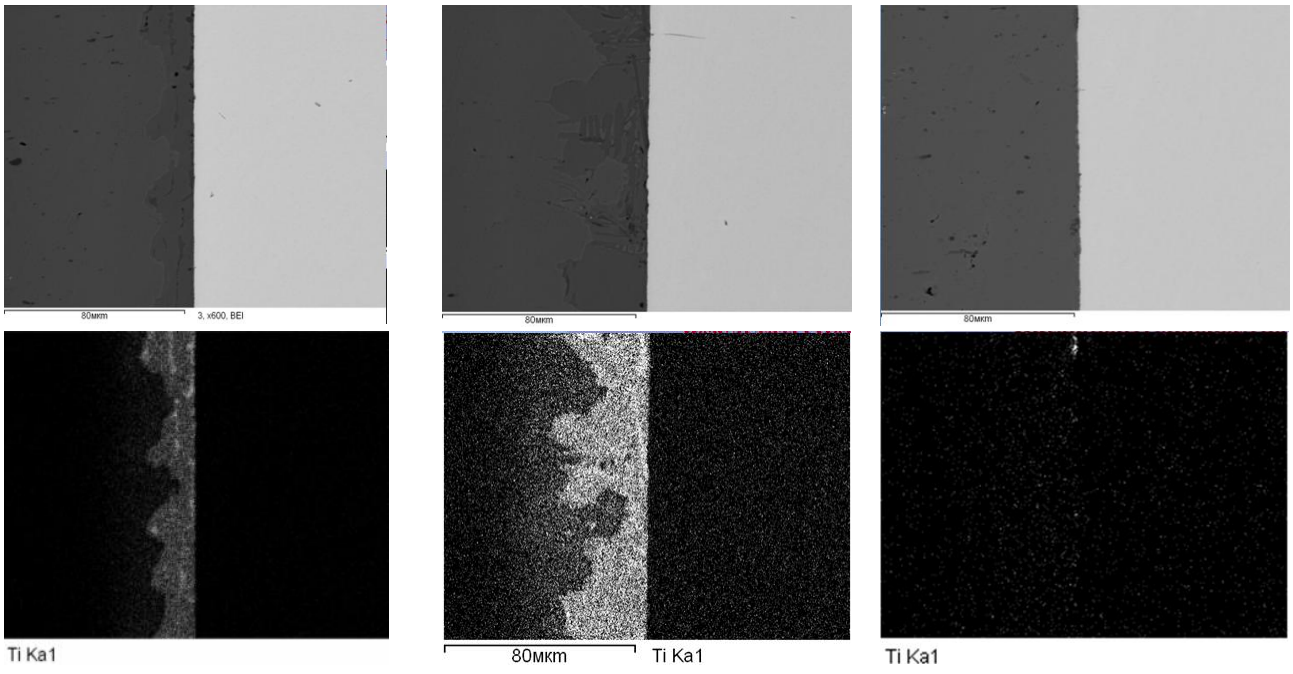


Рис. 4. Микроструктура (*а*) и распределение титана (*б*) в паяных соединениях W–БрНХК припой Cu-Ti-Be, Т = 900 °С, выдержка 2 мин (слева – бронза, справа – вольфрам)

В результате измерения микротвердости была выявлена зона пониженной (на величину 7–15%) микротвердости бронзовой матрицы, находящаяся на расстоянии 80–100 мкм от границы раздела паяного шва и вольфрама. По-видимому, это связано с тем, что при высоких температурах (950 °С) и больших временах выдержки, как отмечено выше, в приповерхностном слое бронзы происходит изменение структурно-фазового состояния, связанное с растворением легирующих элементов в расплаве припоя. Вблизи границы с вольфрамом микротвердость увеличилась в 2–2,5 раза вследствие образования твердых силицидов титана.

В процессе пайки вольфрама с бронзой БрХЦр в шве формируется несколько иная по сравнению с БрНХК микроструктура иного химического состава этой бронзы (рис. 5).



а) *б*) *в*)

Рис .5. Микроструктуры (вверху) и распределение титана (внизу) в паяных соединениях W–БрХЦр: *а*) Т=950 °С, 2 мин (припой Cu-Ti); *б*) Т = 950 °С, 2 мин (припой Cu-Ti-Be); *в*) Т = 950 °С, 30 мин (припой Cu-Ti-Be) (слева - бронза, справа - вольфрам)

Картина распределения фаз и элементов в области паяного шва характеризуется отсутствием выделений в зоне спая. Ширина паяного шва при пайке припоем Cu-Ti при температуре 950 °С в течение 2 мин составила порядка 25 мкм при исходной толщине ленты припоя 45 мкм. При пайке припоем Cu-Ti-Be при температуре 950 °С в течение 2 мин ширина паяного шва составила 45–50 мкм, в то время как после пайки при температуре 950 °С в течение 30 мин паяный шов отсутствовал вследствие диффузионного перераспределения компонентов и припоя, и паяемых металлов. Так же как и в случае с бронзой БрНХК, с увеличением времени выдержки при пайке происходит уменьшение концентрации титана непосредственно в зоне шва за счет растворения его в бронзовой матрице. Такое растворение приводит к тому, что в соединении, спаянном припоем Cu-Ti-Be при 950 °С в течение 30 мин, концентрация титана в зоне пайки мала и составляет порядка 1,5%.

Механизм формирования такого паяного шва с использованием припоя Cu-Ti можно описать следующим образом. При затвердевании расплава припоя фронт кристаллизации движется от бронзы по направлению к вольфраму (рис. 6). В процессе нагрева припой Cu-28%Ti расплавляется при температуре 887 °С (точка Н).

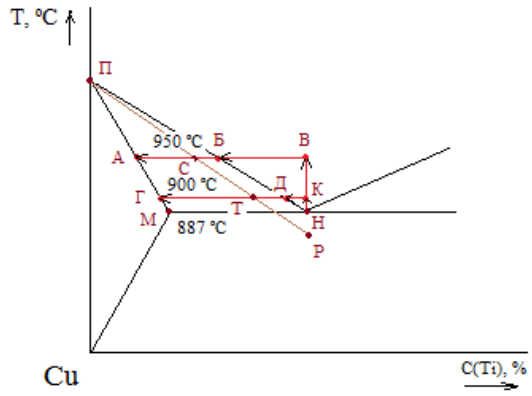


Рис. 6. Схематическое изображение процесса кристаллизации зоны пайки бронзы БрХЦр с применением припоя Cu-28%Ti

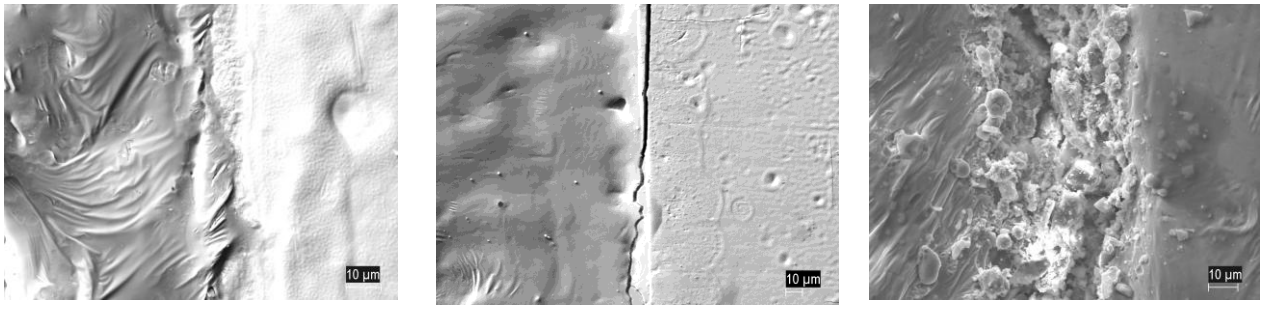
Рассмотрим расплавы при температурах 900 °С и 950 °С, которым соответствуют точки К и В соответственно. Все точки Н, К и В взяты при содержании титана 28%. Ширина ванны расплава припоя соответствует толщине исходной ленты 45 мкм. При этом химический состав расплава припоя будет изменяться по направлению В→Б (при 950 °С) и К→Д (при 900 °С), где точка Б соответствует 14%Ti, а точка Д соответствует 19%Ti. При этом оценочная ширина ванны расплава будет составлять примерно 54 и 77 мкм в точках Д и Б соответственно. По достижении линии ликвидус расплав начинает гетерогенно кристаллизоваться с выпадением кристаллов твёрдого раствора Ti в Cu состава 4%Ti при температуре при 950 °С (точка А) и состава 6%Ti при температуре 900 °С (точка Г). Так как содержание титана в расплаве, соответствующего точке Д, выше, чем в точке Б, то возникающий концентрационный градиент между твердой и жидкой фазами будет выше при более низкой температуре сплава. В этом процессе нужно учесть взаимодействие расплава припоя с бронзой, компоненты которой начнут растворяться. Процесс растворения бронзы будет протекать до термодинамического равновесия твердой и жидкой фаз. Время пайки и, следовательно, растворения бронзы при 900 °С меньше чем при 950 °С. Поэтому в процессе кристаллизации зоны пайки образуются кристаллы с большим содержанием титана. Все сказанное выше подтверждает то, что при низкой температуре в системе Cu-Ti имеет место более высокая равновесная концентрация титана в меди и, следовательно, в бронзе, что вызывает более интен-

сивное растворение титана в бронзовой матрице. При этом формируется более узкий паяный шов, что и подтверждают экспериментальные результаты (см. рис. 5).

В дополнение к этому, результаты количественного микрорентгеноспектрального анализа свидетельствуют о том, что при режиме пайки T = 950 °С, 2 мин не происходит диффузионного затвердевания и поэтому химический состав застывшего расплава соответствует составу исходного припоя. Увеличение времени выдержки при пайке приводит к полному растворению титана в бронзе БрХЦр, за счет чего происходит затвердевание при температуре пайки (диффузионная пайка). При использовании припоя Cu-Ti-Be процесс формирования состава в зоне пайки можно представить таким же, однако для припоя, обладающего более низкой температурой плавления, линия ПН на рис. 6 сместится в положение ПР, что приведет к тому, что при одном и том же технологическом режиме пайки (950 °С, 2 мин) шов соединения, спаянного припоем Cu-Ti, будет уже, чем при использовании припоя Cu-Ti-Be. Тем не менее, применение припоя Cu-Ti-Be целесообразнее, так как процесс пайки можно осуществлять при меньших температурах, чем при использовании припоя Cu-Ti.

При пайке сплава МАГТ припоями Cu-Ti, Cu-Ti-Be, в процессе взаимодействия расплавленного припоя с поверхностью МАГТ формируется шов шириной 100–120 мкм с сильной эрозией последнего. Исходная структура медного сплава приводит к тому, что при взаимодействии с расплавом происходит «выщелачивание» отдельных и групп зерен. Это подтверждается содержанием в них титана, соответствующего предельной растворимости в меди. В результате взаимодействия компонентов припоя и сплава МАГТ формируется более широкий шов. При этом общая картина формирования паяного шва одинакова как для припоя Cu-Ti, так и для Cu-Ti-Be.

Исследование термостойкости паяных соединений, полученных при температуре 950 ºС и времени выдержки 30 мин с использованием припоя Cu-Ti, проводили путем облучения высокотемпературной дейтериевой импульсной плазмой (ВТИП) при фиксированной удельной мощности потока W = 5 МВт/см^2 и числе импульсов N = 2. На рис. 7 представлены результаты этих исследований.



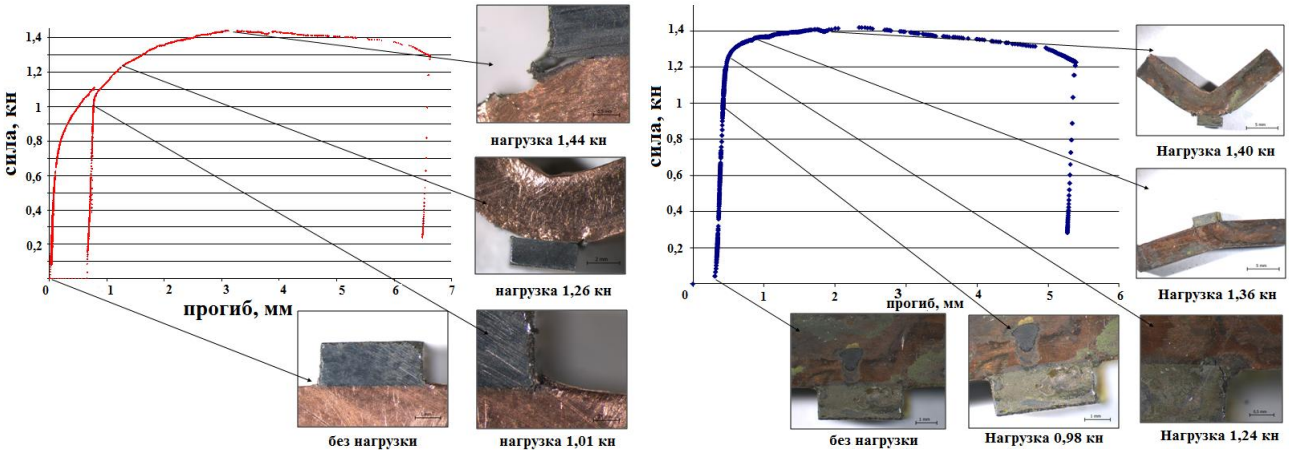
а) *б*) *в*)

Рис. 7. Поверхность торцевого среза готового паяного соединения вольфрама (справа) с бронзой марок БрХЦр (*а*), БрНХК (*б*) и МАТТ (*в*) после воздействия потоками ВТИП с W = 5 МВт/см^2 и N = 2

Анализ полученных результатов показал, что, начиная с воздействия первых импульсов потоков ВТИП в режиме облучения с W = 5 МВт/см^2 торцевая поверхность напаянной вольфрамовой пластины имеет трещины и оплавления во всех случаях независимо от состава материала припоя и теплоотводящего сплава. Теплоотводящие материалы во всех случаях подвержены интенсивному оплавлению и вскипанию, о чем свидетельствует развитый рельеф в виде волн застывшего металла, наличие капель, кратеров и пор. Торцевая поверхность

зоны пайки под воздействием ВТИП ведет себя не однозначно. Слой припоя на паяных соединениях W-БрХЦр не подвержен растрескиванию (см. рис. 7, а). Шов однороден по длине, средняя толщина слоя по длине паяного соединения составляет около 20 мкм. Соединение W–БрНХК начинает растрескиваться вдоль слоя паяной зоны (см. рис. 7, б). Ширина трещин составляет 2–3 мкм. Слой припоя в соединении W–МАГТ растрескивается во всем объеме соединения (см. рис. 7, в). Ширина трещин составляет 3–5 мкм. Сам шов сильно проэродирован и неоднороден по поверхности, толщина слоя составляет около 50 мкм, причем в области шва присутствуют в сравнительно большом количестве кислород и алюминий – компоненты, входящие в состав сплава МАТТ.

Паяные соединения W–БрХЦр подвергали механическим испытаниям до и после нейтронного облучения (флюенс $1{,}8\cdot10^{24}$ н/м^2, $E > 0{,}1$ МэВ, $T = 200$ °С). Механические испытания проводили методом трехточечного изгиба. В процессе испытания паяных образцов проводилась фотосъемка. Результаты испытаний приведены на рис. 8. Было установлено, что до и после облучения характер разрушения испытуемых образцов не изменяется. В обоих случаях процесс разрушения соединения начинался с галтельного участка места спая, в котором зарождалась трещина под углом 45º к плоскости паяного шва и распространялась вглубь бронзы. По мере увеличения нагрузки образовывалась трещина в теле вольфрама под углом 45º к поверхности раздела материалов, которая распространялась до области спая. Затем разрушение шло вдоль границы раздела W–БрХЦр. Дальнейшее увеличение нагрузки приводило исключительно к деформации бронзы. Исходя из результатов, представленных на кривых напряжение–прогиб, и анализа микрофотографий можно сделать вывод о том, что при трехточечном изгибе паяного соединения W–БрХЦр трещина зарождается в зоне концентрации напряжений (галтельный участок паяного шва) в момент начала пластической деформации бронзы, а при развитии пластической деформации бронзовой основы распространяется вдоль паянного шва. В целом можно заключить, что увеличение предела текучести в результате нейтронного облучения является положительным моментом, т.к. сопровождается повышением прочности паяного соединения в целом.



а) *б*)

Рис. 8. Кривая нагружения спаянных образцов W–БрХЦр: *а*) без облучения, *б*) после облучения до флюенса $1{,}8\cdot10^{24}$ н/м^2, $T = 200$ °С

Пятый раздел посвящен разработке аморфных быстрозакаленных ленточных припоев для пайки сплавов на основе ниобия применительно к изготовлению коллекторного пакета электрогенерирующего канала космических ядерно-энергетических установок.

Применение чистых металлов (титан, цирконий и т.д.) в качестве припоев для пайки ниобия ($T_{пл}$ = 2500 °С) и сплавов на его основе (НбЦ-1 и др.) является нецелесообразным. Это связано с тем, что выше 1450 °С у чистого ниобия отмечается собирательная рекристаллизация, при которой ударная вязкость снижается в 20 раз. Для существенного снижения температур плавления припоев в их состав вводят добавки эвтектикообразующих элементов, однако в большинстве случаев их изготавливают в виде порошков (например, 48Ti-48Zr-4Be), что существенно ограничивает область применения таких припоев. Технология сверхбыстрой закалки дает возможность изготавливать эвтектические сплавы в виде лент или фольг, что значительно расширяет возможности применения пайки и, в ряде случаев, упрощает процесс сборки.

Разработку быстрозакаленных припоев для пайки сплавов на основе ниобия осуществляли на основе предложенной методики. Для выбора основы припоя был рассмотрен перечень элементов, образующих с ниобием твердые растворы: Ti, Zr, V, Hf, Ta, Mo и W. Хорошо известно, что металлы Hf, Ta, Mo,W и Nb имеют температуры плавления выше 2000 °С и добиться существенного снижения температуры (до 1000–1200 °С), как этого требует технология пайки, гораздо сложнее чем, например, для Zr ($T_{пл}$ = 1855 °С), Ti ($T_{пл}$ = 1670 °С) или V ($T_{пл}$ = 1910 °С). Учитывая, что ниобий снижает температуру плавления Zr и V в соотношениях Zr-19Nb ($T_{пл}$ = 1740 °С) и V-35Nb ($T_{пл}$ = 1860 °С), в качестве основы припоя для дальнейших исследований был выбран сплав Zr-19Nb. В дополнение была так же рассмотрена система Ti-Zr, в которой при соотношении Ti и Zr 1:1 существует минимум температуры плавления 1535 °С. В таком соотношении Ti и Zr успешно применяют в припое 48Ti-48Zr-4Be, в котором Be используется как депрессант. Однако этот припой изготавливают в виде порошка. Для дальнейшего снижения температуры плавления основы припоя в соответствии с методикой был выбран рад элементов-депресантов: Ni, Fe, Co, Be. Эти элементы образуют эвтектики с Zr с температурами плавления 960, 928, 940 и 950 °С и с Ti – 942, 1085, 1020 и 1030 °С соответственно. Кобальт был исключен из рассмотрения из-за образования под нейтронным облучением радиоактивных нуклидов с жестким γ-излучением. Исходя из предположений о максимальном снижении температуры плавления и минимизации содержания в припое эвтектикообразующих легирующих добавок, наиболее эффективными являются системы сплавов Zr-Fe, Zr-Ni, Zr-Be. Из опыта применения бериллия в качестве депрессанта рекомендуется вводить его в припой в небольших количествах вследствие того, что в процессе пайки он образует в паяном шве хрупкие бериллиды, негативно влияющие на паяные соединения. Учитывая то, что ниобий образует эвтектики и с Fe, и с Ni при температурах 1400 и 1175 °С соответственно, предложено легировать основу Zr-19Nb железом и никелем суммарным содержанием до 15%.

Исходя из вышесказанного, для дальнейших исследований были выбраны системы сплавов: Zr-19Nb-*X* где *X* = 15–16% (Ni+Fe+Be); Zr-25V-15(Ni, Fe); эвтектические сплавы Zr-V, Zr-Ni и 48Zr-48Ti-4Be. Последний применяется в качестве порошкового припоя.

В табл. 1 приведены составы припоев, полученных технологией сверхбыстрой закалки. В виде гибких лент были изготовлены сплавы составов (мас.%): 66Zr-19Nb-15Ni, 65Zr-19Nb-15Ni-1Be, 66Zr-19Nb-7,5Fe-7,5Ni, 83Zr-17Ni, 48Zr-48Ti-4Be.

Температуры фазовых превращений в полученных ленточных сплавах изучали методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Результаты измерений приведены в табл. 2.

Таблица 1

Быстрозакаленные припои для пайки сплавов ниобия

Химический состав	**Особенности**
66Zr-19Nb-15Fe	Хрупкие фрагменты ленты
66Zr-19Nb-15Ni	Гибкая лента, местами хрупкая; ширина 1,3±0,2 мм; толщина 30±5 мкм
65Zr-19Nb-15Ni-1Be	Гибкая лента; ширина 1,3±0,2 мм; толщина 30±5 мкм
66Zr-19Nb-7,5Fe-7,5Ni	Гибкая лента, местами хрупкая; ширина 1,3±0,2 мм; толщина 30±5 мкм
60Zr-25V-15Ni	Хрупкие фрагменты ленты
60Zr-25V-15Fe	Хрупкие фрагменты ленты
83Zr-17Ni	Гибкая лента; ширина 2,0±0,1 мм; толщина 30±5 мкм
70Zr-30V	Хрупкие фрагменты ленты
48Zr-48Ti-4Be	Гибкая лента; ширина 10±1 мм; толщина 45±5 мкм

Таблица 2

Результаты термического анализа быстрозакаленных ленточных припоев

Состав, мас.%	Температура солидус, °С	Температура ликвидус, °С	Интервал плавления, °С
Zr-19Nb-15Ni	1000	1080	80
Zr-19Nb-15Ni-1Be	846	924	78
Zr-19Nb-7,5Ni-7,5Fe	968	1002	34

Структурное состояние полученных лент определяли методом рентгеновской дифрактометрии. Из анализа полученных результатов было установлено, что все полученные ленточные припои являются рентгено-аморфными, о чем свидетельствует наличие гало на всех рентгенограммах.

Пайку образцов и макетов ЭГК осуществляли в вакуумной печи с резистивным нагревом. Режимы пайки представлены в табл. 3.

Таблица 3

Режимы пайки сплавов на основе ниобия

Материал	Припой	Режим*	Расположение припоя	Примечание
ВН2	48Zr-48Ti-4Be	1050 ºС, 15 мин	Возле капилляра	Плоские образцы с фиксированным зазором 50 мкм
НбЦ-1	Zr-19Nb-15Ni	1200 ºС, 5 мин	В поперечно проточенных каналах	Цилиндрические коаксиально соединяемые образцы с технологическими каналами
НбЦ-1	60Pd-40Ni	1260 ºС, 10 мин	В поперечно проточенных каналах	Цилиндрические соосные коаксиально соединяемые образцы с технологическими каналами

*вакууме не хуже 10^{-5} мм.рт.ст.

Металлографический анализ зоны пайки соединения ВН2-ВН2 показал, что структура шва, образовавшегося в процессе затекания припоя в зазор, в поперечном и продольном сечениях одинаковая (рис. 9). Ширина шва составляет 85 мкм при изначальной ширине зазора 50 мкм. Расширение шва связано с физико-химическим взаимодействием компонентов при-

поя и сплава при достаточно высокой температуре пайки и длительной выдержке. В структуре паяного шва были обнаружены 3 области: 1 – точка 2; 2 – точка 4; 3 – точки 3 и 5.

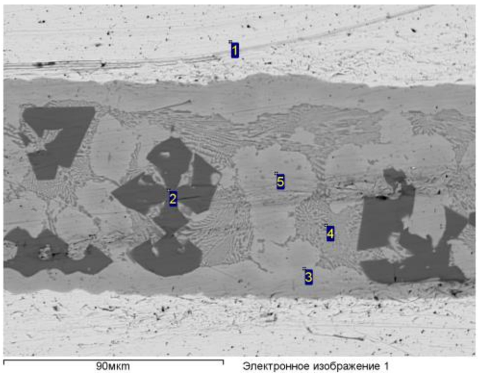


Рис. 9. Микроструктура соединения ВН2-ВН2, паяного припоем 48%Ti- 48%Zr-4%Be при температуре 1050 ºC, 15 мин (в обратно рассеянных электронах)

Сравнительный анализ концентраций элементов в 3-х зонах показал, что во всех присутствующих выделениях второй фазы соотношение титана и ниобия приблизительно одинаково и соответствует 61,5% Ti (точка 2), 61,9% Ti (точка 3), 63,5% Ti (точка 4), 60,8% Ti (точка 5) по отношению к ниобию. Из этих данных видно, что соотношение титан/ниобий с небольшим отклонением выдерживается по всему паяному шву. Изменяется только соотношение (титан, ниобий) / цирконий, которое составляет 21,04% Zr (точка 2), 44,8% Zr (точка 3), 63,85% Zr (точка 4), 36,24% Zr (точка 5) по отношению к (титан + ниобий). Ограниченные приборные возможности микроанализа не позволяют получить распределение бериллия и, хотя бы приблизительно, оценить его концентрацию в выделениях, образовавшихся в паяном шве. Тем не менее, качественную информацию о распределении бериллия можно получить в обратно отраженных электронах по контрасту: более темные выделения на изображении соответствуют местам с повышенным содержанием бериллия. К таким областям относятся в первую очередь зона 1 (точка 2) и зона 2 (точка 4) – область, образовавшаяся в ходе предполагаемой монотектоидной реакции. Результаты измерений микротвердости в паяном шве соединения ВН2-ВН2 приведены на рис. 10.

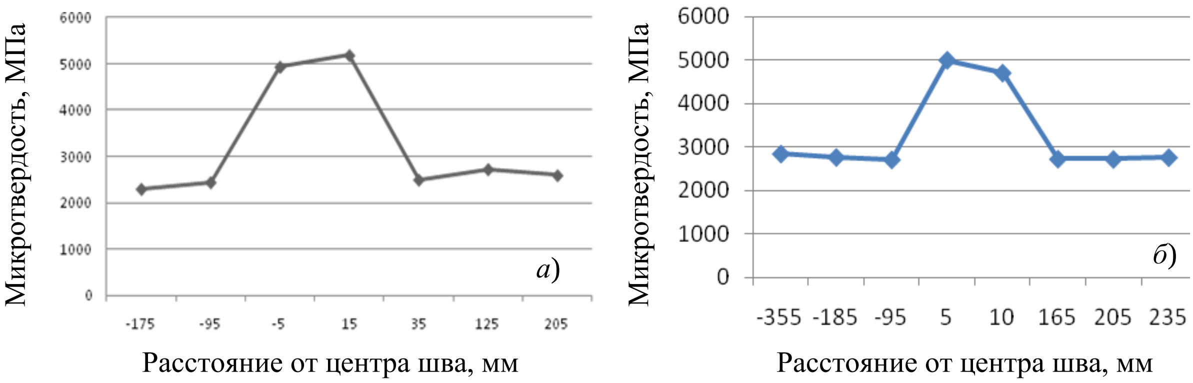
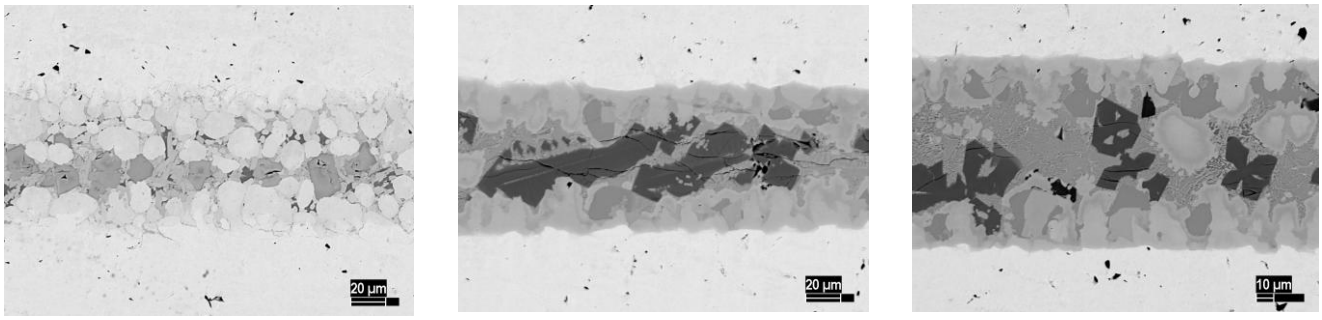


Рис ... аяного ш
48Ti-48Zr ... в попереч

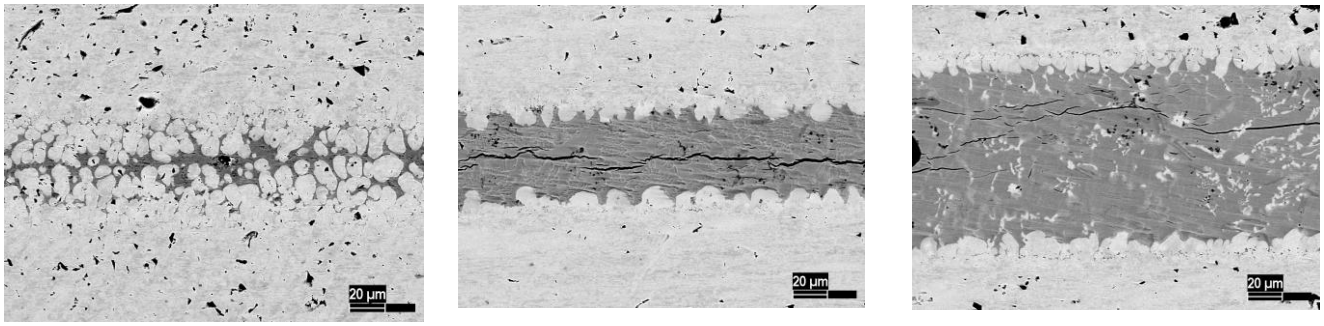
Ка ... аибольш ...)
изменени ... нтре пая ... м
лежат в ... детельст ... -
мах пайк ... ся интер ... -
жительн ... еличени

В процессе сборки элементов коллекторного пакета ЭГК немаловажную роль играет зазор между цилиндрами, который будет заполнять расплавленный припой. Очевидно, что в зависимости от величины зазора, в зоне пайки будет формироваться различная структура. Для определения оптимального зазора при пайке были изготовлены образцы в виде клиньев, которые устанавливали непосредственно на припой. В процессе пайки за счет капиллярных сил расплавленный припой заполнял пространство между пластинами клина. На рис. 11–13 приведены микроструктуры зоны пайки клиньев, полученных с применением припоев Zr-48Ti-4Be, Zr-17Ni, Zr-19Nb-15 Ni соответственно.



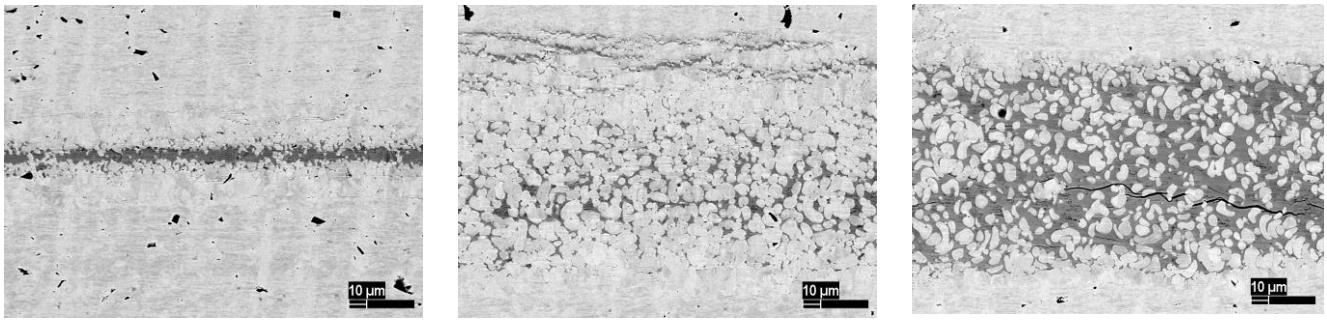
зазор 10 мкм зазор 50 мкм зазор 90 мкм

Рис. 11. Микроструктуры паяных соединений НбЦ-1-НбЦ-1 в зависимости от величины зазора (припой Zr-48Ti-4Be, режим пайки – 1100 °С, 15 мин)



зазор 10 мкм зазор 50 мкм зазор 90 мкм

Рис. 12. Микроструктуры паяных соединений НбЦ-1–НбЦ-1 в зависимости от величины зазора (припой Zr-17Ni, режим пайки – 1100 °С, 15 мин)



зазор 20 мкм зазор 50 мкм зазор 80 мкм

Рис. 13. Микроструктуры паяных соединений НбЦ-1–НбЦ-1 в зависимости от величины зазора (припой Zr-19Nb-15Ni, режим пайки – 1120 °С, 15 мин)

Увеличение расстояния между пластинами приводит к формированию в зоне пайки различной структуры, что обусловлено особенностями физико-химического взаимодействия расплавленного припоя и паяемых материалов при изменении межпластинчатого зазора. При использовании припоя Zr-48Ti-4Be при зазорах более 20 мкм в паяном шве формируется структура с выделением фаз ограненной формы как и в случае пайки сплава ВН2 (см. рис. 9). При этом по всему шву, начиная от зазора 30 мкм и более, по этим выделениям были зафиксированы трещины, параллельные паяемым поверхностям (см. рис. 11). При зазорах менее 30 мкм формируется структура с образованием твердого раствора без каких либо дефектов в зоне пайки. Полученные результаты показали, что наиболее оптимальным является зазор 20 мкм. Однако обеспечить такое расстояние между цилиндрами в процессе сборки коллекторного пакета ЭГК практически невозможно.

При исследовании структуры соединений, паяных припоями Zr-17Ni и Zr-19Nb-15Ni, был обнаружен ряд закономерностей в процессе формирования структуры в зоне пайки при изменении зазора между паяемыми поверхностями. Отсутствие в составе припоя Zr-17Ni ниобия приводит к тому, что при больших зазорах (50–100 мкм) в процессе взаимодействия расплава припоя и паяемого материала (НбЦ-1) происходит выщелачивание отдельных и групп зерен, растворение их в расплаве припоя (см. рис. 12). Это вызывает увеличение содержания ниобия в расплаве. При зазорах 30–40 мкм происходит такое же «выщелачивание» зерен, однако расплав припоя насыщается ниобием до 4–5%, и процесс растворения прекращается. Вследствие этого в структуре зоны пайки присутствуют нерастворенные зерна твердого раствора на основе ниобия, в котором содержание циркония достигает 20%. При зазорах менее 40 мкм количество таких зерен увеличивается и уже при 20 мкм структура зоны пайки представляет собой переход от сплава НбЦ-1 к сплаву НбЦ-1 через группу зерен твердого раствора на основе ниобия, по границам которого расположен интерметаллид Zr_2Ni. Такой результат взаимодействия является следствием того, что с увеличением зазора между паяемыми плоскостями увеличивается количество расплавленного припоя, который растворяет в себе ниобий. Из-за того, что как при маленьких, так и при больших зазорах процесс физико-химического взаимодействия происходит в одинаковых условиях, количество зерен твердого раствора на основе ниобия в зоне пайки увеличивается с уменьшением зазора, так как процесс насыщения ниобием расплава при больших зазорах не наступает. Однако в центре клиновидного паяного шва была обнаружена трещина вдоль всей зоны пайки от максимального зазора 100 мкм до 20 мкм, при котором распространение ее блокируют пластичные зерна твердого раствора на основе ниобия. Наличие в составе припоя ниобия (Zr-19Nb-15Ni) приводит несколько к другому результату физико-химического взаимодействия расплавленного припоя и паяемого материала. Из результатов металлографического анализа видно, что даже при достаточно больших зазорах (80 мкм) зона пайки состоит из двух фаз (см. рис. 13): твердого раствора на основе Nb и интерметаллида Zr_2Ni, причем с уменьшением зазора доля первой фазы в шве значительно возрастает. Наличие в зоне пайки зерен твердого раствора на основе ниобия при больших зазорах является следствием того, что ниобий изначально входит в состав припоя, и насыщение расплава припоя ниобием в процессе пайки наступает гораздо раньше, чем при пайке припоем Zr-Ni. Установлено, что при зазоре 70 мкм в паяном шве зерна твердого раствора на основе ниобия препятствуют распространению трещины, образовавшейся в процессе пайки при больших зазорах, в которых формируется шов со значительным количеством интерметаллида Zr_2Ni. При очень маленьких зазорах (20 мкм и менее) структура зоны пайки представляет собой смесь двух фаз ZrNi и Zr_2Ni (см. рис. 13), которые являются эвтектикообразующими. Поэтому наиболее оп-

тимальным при пайке сплава на основе ниобия НбЦ-1 припоем Zr-19Nb-15Ni является зазор 30–60 мкм.

На рис. 14. приведены результаты металлографических исследований и микрорентгеноспектрального анализа паяного соединения НбЦ-1–НбЦ-1 макета коллекторного пакета ЭГК припоем Zr-19Nb-15Ni при температуре 1200 ºС, 5 мин. Отчетливо виден (темный) технологический канал без заплавления и нарушения геометрии, обеспечивающий в процессе эксплуатации коллекторного пакета выход газообразных продуктов деления ядерного топлива. Следует отметить, что структура зоны пайки идентична структуре, полученной на образцах в виде клиньев.

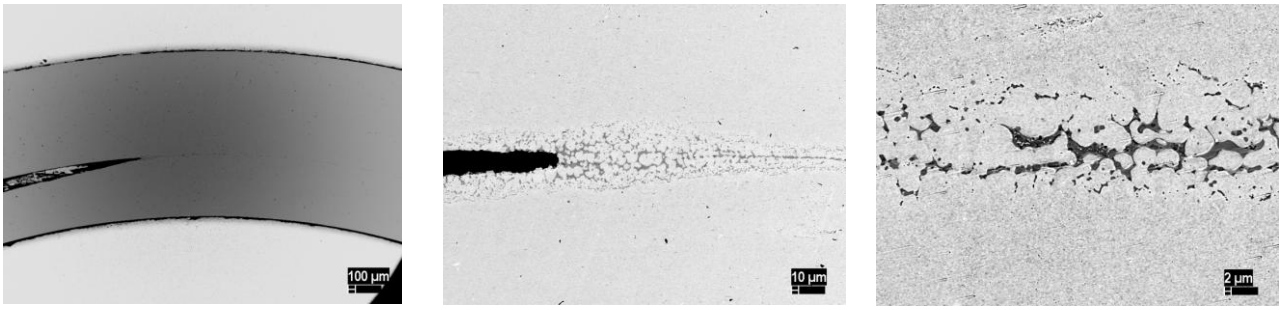


Рис. 14. Микроструктура соединения НбЦ-1–НбЦ-1 паяного припоем Zr-19Nb-15Ni при температуре 1200 ºС, 5 мин (в различном масштабе)

Для сравнения была проведена пайка макета коллекторного пакета ЭГК из сплава НбЦ-1 штатным припоем состава 60Pd-40Ni. Результаты металлографических исследований в зоне пайки соединений НбЦ-1–НбЦ-1 представлены на рис. 15.

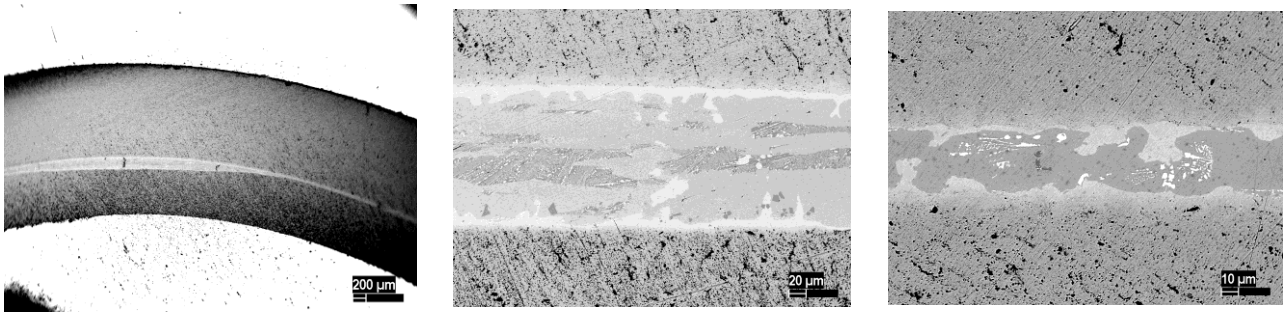


Рис. 15. Микроструктура соединения НбЦ-1–НбЦ-1, спаянного припоем 60Pd-40Ni при температуре 1260 ºС, 10 мин (в различном масштабе)

При анализе совокупности полученных данных установлено, что в процессе пайки происходит заплавление технологических каналов. Паяный шов представляет собой смесь двух фаз, состоящих в основном из Nb и Pd. Содержание никеля в паяном шве не превышает 25%, в некоторых фазах его содержание составляет около 5%. Это может свидетельствовать о том, что в процессе пайки образуется эвтектика между никелем и ниобием, которая увеличивает объем жидкой “ванны”. В процессе пайки это приводит к неизбежному нарушению геометрии изделия в околошовной области и, после затвердевания, наблюдается снижение концентрации никеля по всему шву, что подтверждается результатами химического анализа. Также были обнаружены по всему паяному шву образования с повышенной концентрацией Zr (до 20%), причем в основном металле его содержание не превышает 1%. Основными компонентами таких выделений является Nb и Pd.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основе анализа физико-химического взаимодействия компонентов припоя и паяемых материалов разработана методика выбора химического состава быстрозакаленных сплавов-припоев для пайки однородных и разнородных материалов.
2. Разработан новый аморфный быстрозакаленный высокотемпературный ленточный припой состава Cu-28%Ti-1%Be и отработан технологический режим получения неразъемных соединений W–БрХЦр с высоким сопротивлением термическому воздействию.
3. Показано, что при нейтронном облучении в реакторе БОР-60 до флюенса $1{,}8 \cdot 10^{24}$ н/м^2 не происходит деградации паяного шва: при испытаниях методом трехточечного изгиба разрушение паяных образцов W–БрХЦр, соединенных с применением припоя Cu-28%Ti-1%Be начинается лишь в момент начала пластической деформации бронзы.
4. Предложен физико-химический механизм перераспределения компонентов припоя и бронзы в процессе формирования неразъемного соединения W–БрХЦр при использовании припоев Cu-28%Ti и Cu-28%Ti-1%Be.
5. Разработаны новые аморфные быстрозакаленные высокотемпературные ленточные припои на основе циркония: Zr-19%Nb-15%Ni, Zr-19%Nb-15%Ni-1%Be, Zr-19%Nb-7,5%Ni-7,5%Fe и предложены оптимальные зазоры и технологические режимы пайки сплавов на основе ниобия. В результате сравнительной пайки макета коллекторного пакета ЭГК из сплава на основе ниобия НбЦ-1 показано превосходство аморфного припоя Zr-19%Nb-15%Ni над кристаллическим припоем 60%Pd-40%Ni.
6. Отработана технология получения сплава–припоя 48%Ti-48%Zr-4%Be в виде аморфной ленты для пайки сплавов на основе ниобия.

Аморфные ленточный припой Cu-28Ti-1Be (мас.%) и технология пайки вольфрама с бронзой БрХЦр внедрены на предприятии НТЦ «Синтез» ФГУП НИИЭФА им. Д.В. Ефремова (г. Санкт-Петербург) для изготовления макетов фрагмента «домика» дивертора экспериментального термоядерного реактора ИТЭР (АКТ №5 от 14.02.2011 г.).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Kalin B.A., Fedotov V.T., Sevrjukov O.N., Suchkov A.N., Moslang A., Rohde M. Development of brazing foils to join monocrystalline tungsten alloys with EUROFER Steel. – J. of Nucl. Mater. v. 367–370, part B, 2007, p.1218–1222.
2. Сучков А.Н., Калин Б.А., Федотов В.Т., Севрюков О.Н. Разработка быстрозакаленных припоев для пайки вольфрама с ферритной сталью. – В сб.: Труды научной сессии МИФИ-2006, М.: 2006, т. 9, с. 212–213.
3. Сучков А.Н., Калин Б.А., Федотов В.Т., Севрюков О.Н. Создание термостабильных неоднородных структур паяных соединений разнородных материалов. – В сб.: Научные труды Евразийской конф. “Прочность неоднородных структур ПРОСТ-2006”, М.: МИСиС, 2006, с. 95–96.
4. Сучков А.Н., Калин Б.А., Федотов В.Т., Севрюков О.Н. Получение сложных композиционных соединений из разнородных материалов с использованием быстрозакаленных припоев. – В кн.: Материалы IV научно-практической конференции материаловедческих обществ России “Новые градиентные и слоистые композиты”. М.: МИФИ, 2006, с. 56–57.

5. Kalin B.A., Polsky V.I., Yakushin V.L., Fedotov V.T., Sevrjukov O.N., Golikov M.Yu., Suchkov A.N. Erosion of plasma-facing materials and tiles under plasma fluxes. – In.: Abstracts of 17th Intern. Conf. on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, Hefei Anhui, China, May 22–26, 2006, p. 127.
6. Сучков А.Н., Калин Б.А., Федотов В.Т., Севрюков О.Н. Применение быстрозакаленных сплавов для плакирования сталей. – В сб.: Труды научной сессии МИФИ-2007, т. 9, с. 68–70.
7. Сучков А.Н., Калин Б.А., Федотов В.Т., Севрюков О.Н., Мощенко М.Г. Разработка быстрозакаленных припоев для пайки узлов дивертора термоядерного реактора. – В кн.: Материалы семинара "Пайка–2007", ч. II, Москва, 2007 г., с. 66–73.
8. Калин Б.А., Севрюков О.Н., Сучков А.Н., Тенишев А.В. Изучение фазовых превращений в аморфных материалах методом ДСК. / Учебное пособие, М.: МИФИ, 2008. – 40 с.
9. Сучков А.Н., Калин Б.А., Федотов В.Т., Севрюков О.Н. Разработка быстрозакаленных наноструктурных припоев для пайки узлов дивертора термоядерного реактора. – В сб.: Труды научной сессии МИФИ-2008, т. 7, с. 101–103.
10. Сучков А.Н., Федотов В.Т., Севрюков О.Н., Чжо Сва Тхун. Разработка аморфного ленточного припоя для пайки тугоплавких металлов и сплавов. – В сб.: Материалы научно-технической конференции "Пайка–2008", Тольятти, 10–12 сентября 2008 г., с. 215–216.
11. Сучков А.Н., Калин Б.А., Федотов В.Т., Севрюков О.Н., Якушин В.Л., Польский В.И., Джумаев П.С. Быстрозакаленные наноструктурированные припои для пайки энергонапряженных узлов реактора ИТЭР. – В сб.: Доклады школы-семинара «Нанотехнологии - производству-2009», 21–26 сентября 2009 г., Москва, МИСиС, с. 226–237.
12. Калин Б.А., Якушин В.Л., Джумаев П.С., Польский В.И., Севрюков О.Н, Сучков А.Н., Федотов В.Т. Разработка метода создания металлических материалов с нанокристаллическим поверхностным слоем при воздействии потоков импульсной плазмы. – В сб.: Научные труды сессии МИФИ-2009, т.1. Ядерная физика и энергетика. Нанофизика и нанотехнологии. Фундаментальные проблемы науки. Информационная безопасность. М.: МИФИ, 2009, с. 75–80.
13. Сучков А.Н., Калин Б.А., Севрюков О.Н, Федотов В.Т. Разработка и применение быстрозакаленныъх наноструктурированных припоев. – В сб.: Тезисы докладов 2-го международного конкурса научных работ молодых ученых в области нанотехнологий. Международный форум по нанотехнологиям, 6–8 октября 2009 г., Rusnanotech-09, с. 462–463.
14. Сучков А.Н., Калин Б.А., Федотов В.Т., Севрюков О.Н., Иванников А.А., Якушин В.Л., Польский В.И., Джумаев П.С. Разработка и применение быстозакаленных наноструктурированных припоев для пайки узлов активной зоны космических ЯЭУ и энергонапряженных элементов ТЯР. – В сб.: Тезисы докладов конференции МАЯТ-2010, Туапсе, 26 сентября – 02 октября 2010 г., Москва, с. 73.
15. Севрюков О.Н., Федотов В.Т., Сучков А.Н., Джумаев П.С., Тар Хтет. Пайка образцов упрочненного наночастицами кубического нитрида бора быстрозакаленными припоями. – В сб.: Труды научной сессии НИЯУ МИФИ-2010, Москва, 2010, т. 2, с. 177–178.
16. Сучков А.Н., Калин Б.А., Федотов В.Т., Севрюков О.Н., Иванников А.А., Якушин В.Л., Польский В.И., Джумаев П.С. Применение быстрозакаленных наноструктурированных ленточных припоев для пайки элементов коллекторного узла электрогенерирующего канала ядерного реактора. – В сб.: Труды научной сессии НИЯУ МИФИ-2010, Москва, 2010, т. 2, с. 173–176.

17. Сучков А.Н., Федотов В.Т, Севрюков О.Н, Калин Б.А., Иванников А.А., Якушин В.Л., Джумаев П.С. Быстрозакаленные ленточные аморфные припои для высокотемпературной пайки сплавов на основе ниобия. – Сварочное производство, 2010, № 5, с. 47–51.
18. Калин Б.А., Якушин В.Л., Джумаев П.С., Польский В.И., Головчанский И.А., Федотов В.Т., Севрюков О.Н., Сучков А.Н. Разработка метода создания металлических материалов с наноструктурированным поверхностным слоем путем обработки потоками высокотемпеатурной импульсной плазмы. – Физика и химия обработки материалов, 2010, № 1, с. 29-35.
19. Kalin B.A., Suchkov A.N., Fedotov V.T., Sevryukov O.N., Ivannikov A.A. Application of the rapidly quenched ribbon-type filler metals for brazing the heavy-loaded elements of ITER. – In.: Abstracts of Monaco ITER International Fusion Energy Days. First Joint IAEA-ITER Technical Meeting. Analysis of ITER Materials and Technologies, Monaco, 2010, p. 28.
20. Иванников А.А., Сучков А.Н., Калин Б.А., Федотов В.Т., Севрюков О.Н., Якушин В.Л., Польский В.И., Джумаев П.С. Быстрозакаленный высокотемпературный наноструктурированный ленточный припой на основе никеля для пайки жаропрочных сталей. – В сб.: Аннотации докладов научной сессии НИЯУ МИФИ-2011, т. 1, Инновационные ядерные технологии, Москва, 2011, с. 149.
21. Нечаев В.В., Севрюков О.Н., Сучков А.Н., Федотов В.Т. Структурно-фазовые состояния NI-Nb-Si сплавов. – В сб.: Аннотации докладов научной сессии НИЯУ МИФИ-2011, т. 1, Инновационные ядерные технологии, Москва, 2011, с. 159.
22. Калин.Б.А., Польский В.И., Якушин В.Л., Джумаев П.С., Севрюков О.Н., Сучков А.Н., Федотов В.Т., Емельянова О.В., Дмитриева К.К. Эрозия и термостойкость паяных соединений вольфрама с бронзой в условиях, имитирующих срывы плазмы в термоядерных реакторах. – Физика и химия обработки материалов, 2011, № 2, с. 13–22.
23. Kalin B.A., Yakushin V.L., Dzhumaev P.S., Pol'skii V.I., Golovchanskii I.I., Fedotov V.T., Sevryukov O.N., and Suchkov A.N. Development of a method for producing metal materials with a nanostructured surface layer by treatment with high-energy pulsed plasma. – Inorganic Materials: Applied Research, 2011, v. 2, № 3, p. 224–229.
24. Падалко А.Г., Таланова Г.В., Зубарев Г.И., Федотов В.Т., Сучков А.Н., Царев В.И. Термография фазовых превращений в эвтектических сплавах на основе никеля при высоких давлениях и температурах. – Металлы, 2011, № 2, с. 3–9.
25. Калин Б.А., Федотов В.Т., Севрюков О.Н., Сучков А.Н. Припой на основе никеля в виде наноструктурированной ленты (варианты). – Патент РФ на полезную модель №102555, дата регистрации 10 марта 2011 г, приоритет полезной модели от 03 ноября 2010 г.