

На правах рукописи

Бачурина Диана Михайловна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ НЕРАЗЪЕМНОГО СОЕДИНЕНИЯ
СТАЛИ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОГО КЛАССА С ВОЛЬФРАМОМ**

Специальность 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук**

Автор: Бачурина Д.М.



Москва 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**Научный
руководитель:**

Сучков Алексей Николаевич
кандидат технических наук, доцент Отделения ядерной физики и технологий офиса образовательных программ НИЯУ МИФИ

**Официальные
оппоненты:**

Мазуль Игорь Всеволодович
доктор технических наук, главный научный сотрудник,
АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»

Пашков Игорь Николаевич
доктор технических наук, профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Гончаров Алексей Леонидович
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой,
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Защита состоится «14» ноября 2023 г. в 11 час.30 мин. на заседании диссертационного совета МИФИ.1.07 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://ds.mephi.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь диссертационного
совета МИФИ.1.07, к.ф.-м.н.

Савченко А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Стратегия развития термоядерной энергетики предусматривает, что следующим этапом после начала функционирования международного экспериментального реактора ИТЭР будет пуск демонстрационного реактора ДЕМО, концептуальные проекты которого прорабатываются в настоящее время всеми ведущими странами мира. В России в рамках комплексной программы "Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года" по направлению "Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий" разрабатывают проект Токамака с Реакторными Технологиями (РТТ). Все концептуальные проекты будущих термоядерных установок подразумевают наличие Первой Стенки и Дивертора – наиболее напряжённых элементов конструкции. В существующих проектах наиболее перспективным материалом, обращенным к плазме, является вольфрам, а конструкционным – сталь, поэтому в настоящий момент задача их соединения является актуальной. При этом, напрямую их соединить невозможно из-за значительных различий физических свойств, в первую очередь коэффициентов линейного термического расширения (КТР), что может привести к разрушению. Технология соединения вольфрама со сталью для будущих термоядерных установок должна удовлетворять ряду требований: должна быть обеспечена компенсация различия КТР, процесс пайки не должен ухудшать свойств соединяемых материалов, применяемые припои должны удовлетворять требованию малоактивируемости (т.е. остаточная радиоактивность материала не должна превышать 10,0 мЗв/час спустя 100 лет после окончания его использования), паяное соединение должно быть стойким к тепловым нагрузкам, а также к взаимодействию с изотопами водорода (которые являются топливом в термоядерных реакторах).

В настоящей работе предложено решение, позволяющее удовлетворить все описанные выше критерии. Наиболее простым способом является высокотемпературная пайка. Для изготовления компонентов данным методом не требуется дорогостоящего оборудования, процесс является быстрым, а также легко получать изделия сложной геометрии. За счет всех этих преимуществ, а также из-за легкости ремонта дефектных облицовочных плиток (далее тайлов) высокотемпературную пайку применяют при соединении вольфрамовых и бериллиевых тайлов обращенных к плазме компонентов ИТЭР.

Цель работы

Разработать метод получения неразъемного паяного соединения вольфрама с ферритно-мартенситной сталью ЭК-181, удовлетворяющий требованию малоактивируемости, термостойкости и совместимости с внешней агрессивной средой для применения в элементах обращенных к плазме компонентов перспективных термоядерных установок.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- для компенсации термонапряжений между вольфрамом и сталью ЭК-181 на основании литературных данных и расчетов методом конечных элементов выбраны материалы буферных слоев (проставок);
- выявлены перспективные системы медных сплавов-припоев со сниженным содержанием меди, а также проведен сравнительный анализ структуры и термомеханических свойств паяных соединений, полученных с использованием данных припоев;

- установлены особенности формирования структурно-фазового состояния, паяного соединения W/Cu-50Ti/V/Cu-28Ti/ЭК-181 и проведена оценка его механических свойств и термостойкости;
- предложен температурно-временной режим пайки вольфрама со сталью ЭК-181, совмещенный с традиционной термообработкой данной стали для обеспечения оптимального структурно-фазового состояния и уровня механических свойств;
- предложен сплав-припой 48Ti-48Zr-4Be мас. % (TiZr4Be) в виде быстрозакаленной ленты для получения неразъемного соединения W с ЭК-181, полностью удовлетворяющий требование малоактивируемости, выявлены особенности формирования структурно-фазового состояния паяного соединения W/TiZr4Be/Ta/TiZr4Be/ЭК-181 и проведена оценка его механических свойств и термостойкости;
- выявлены особенности взаимодействия дейтерия и жидкого лития с паяным соединением W/TiZr4Be/Ta/TiZr4Be/ЭК-181;
- разработан и изготовлен макет обращенного к плазме компонента на основе паяного соединения W/TiZr4Be/Ta/TiZr4Be/ЭК-181, а также проведены его тепловые испытания в условиях, моделирующих работу термоядерных реакторов.

Научная новизна и практическая значимость работы

1. Впервые разработан метод высокотемпературной пайки вольфрама со сталью ЭК-181, позволяющий совместить процесс пайки и термообработки стали;
2. Впервые изучены процессы формирования структурно-фазового состояния паяных соединений вольфрама со сталью ЭК-181, полученных с применением сплавов-припоев с пониженным содержанием меди и малоактивированного припоя TiZr4Be;
3. Впервые проведен анализ взаимодействия дейтерия и лития с паяным соединением W/TiZr4Be/Ta/TiZr4Be/ЭК-181;
4. Впервые проведены тепловые испытания спаянных макетов обращенных к плазме компонентов ТЯР (W/TiZr4Be/Ta/TiZr4Be/ЭК-181) в ожидаемых условиях работы термоядерных реакторов DEMO и TPT.

Практическая значимость работы

Разработанный способ пайки вольфрама с ферритно-мартенситной сталью ЭК-181 может быть использован для изготовления компонентов первой стенки перспективных термоядерных установок, в которых предъявляют требование малоактивируемости к применяемым материалам, в том числе и зарубежным аналогам стали ЭК-181 – Eurofer, CLAM, JLF, F82H и др.

АО «НИИЭФА» утвердил метод получения неразъемного соединения стали ферритно-мартенситного класса с вольфрамом для изготовления макетов обращенных к плазме компонентов. Получен акт о внедрении.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты сравнительного анализа структуры и свойств паяных соединений вольфрама со сталью ЭК-181, полученных с использованием сплавов-припоев на основе чистой меди и систем Cu-Ge, Cu-Sn, Cu-Ti.
2. Результаты анализа структурно-фазового состояния соединения W/Cu-50Ti/V/Cu-28Ti/ЭК-181, полученного методом высокотемпературной пайки, совмещенным с тра-

диционной термообработкой стали ЭК-181, а также результаты механических испытаний и термостойкости.

3. Результаты анализа структурно-фазового состояния соединения W/TiZr4Be/Ta/TiZr4Be/ЭК-181, полученного методом высокотемпературной пайки, совмещенным с традиционной термообработкой стали ЭК-181, а также результаты механических испытаний и термостойкости.
4. Результаты исследования процессов взаимодействия дейтерия и лития с паяным соединением W/TiZr4Be/Ta/TiZr4Be/ЭК-181.
5. Результаты тепловых испытаний спаянных W/TiZr4Be/Ta/TiZr4Be/ЭК-181 макетов компонентов, обращенных к плазме, перспективных термоядерных реакторов.

Достоверность научных положений, результатов и выводов

Достоверность работы подтверждается применением общепризнанных экспериментальных методик и современного экспериментального оборудования. Работы выполнены в рамках научно-исследовательских грантов (РНФ, РФФИ, Совет по Грантам Президента РФ) с прохождением научно-технического рецензирования экспериментальных результатов, результаты работы опубликованы в рецензируемых высокорейтинговых международных журналах.

Личный вклад автора

Все экспериментальные результаты получены автором или при ее непосредственном участии.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, выводов и библиографии. Работа изложена на 134 страницах, содержит 101 рисунок, 13 таблиц, и список использованных литературных источников из 111 источников.

Апробация работы

Результаты работы были представлены на следующих научных конференциях и семинарах (21 мероприятие): International Conference on Fusion Reactor Materials – 18 (ICFRM-18), 5-10 ноября 2017 г., Аомори, Япония; Прочность неоднородных структур (ПРОСТ 2018), 24-26 Апреля 2018 г., Москва, Россия; 16-ая Международная школа-конференция для молодых ученых и специалистов "Новые материалы: толерантное ядерное топливо", 29 Октября – 2 Ноября 2018 г., Россия, Москва; Международная научно-техническая конференция «Пайка» 2018, 11-14 Сентября 2018 г., Тольятти, Россия; 30TH SYMPOSIUM ON FUSION TECHNOLOGY (SOFT-30), 16-21 Сентября 2018 г., Италия; Взаимодействие плазмы с поверхностью 23-24 Января 2019 г., Москва, Россия; 17th International Conference on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications (PFMC-17), 20-24 Мая 2019 г., Нидерланды; III Международная конференция «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии», 12-15 Ноября 2019 г, Москва, Россия; XVI Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа, 2-5 Декабря 2019 г., Москва, Россия; 17-ая Международная школа-конференция для молодых ученых и специалистов "Новые материалы", 5-8 Ноября 2019, Москва, Россия; Быстрозакаленные материалы и покрытия, 15-16 Октября 2019 г., Москва, Россия; 31st Symposium on Fusion Technology (SOFT-31), 20-25 Сентября 2020, онлайн; Шестой Междисциплинарный Научный Форум с Международным Участием "Новые Материалы и Перспективные Технологии", 23-27 Ноября 2020 г, он-

лайн; НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ: Неравновесные состояния, 14-17 Декабря 2020, онлайн; Plasma Facing Materials Conference 2021 (PFMC-21), 17-21 мая 2021, онлайн; Международная научно-техническая конференция «Пайка-2021», 9-10 Сентября 2021 г, Тольятти, Россия; 20th edition of the International Conference on Fusion Reactor Materials (ICFRM-21), 24-29 Октября 2021, онлайн; 8-bit PhD Event 2021 (Fusenet), 22-23 Ноября 2021 г., онлайн; НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ: Перспективные технологии получения и обработки материалов 19-ая Международная школа-конференции для молодых ученых и специалистов, 14-16 декабря 2021 г., онлайн; XVIII Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов "Физико-химия и технология неорганических материалов", 30 Ноября -3 Декабря 2021 г., Москва, Россия; 25-я конференция «Взаимодействие плазмы с поверхностью», 27-28 Января 2022 г, Москва, Россия.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 16 работ, из них 9 в рецензируемых изданиях, включая 7 работ в журналах, индексируемых в системе цитирования ISI Web of Science и Scopus (4 работы в журналах Q1), 2 работы в журналах, индексируемых ВАК, 7 тезисов докладов на конференциях.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, поставлена цель и обозначены задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе проведен литературный обзор современного состояния в области разработки обращенных к плазме компонентов (ОПК) будущих термоядерных установок. Представлены перспективные конструкции и условия эксплуатации Первой Стенки и Дивертора.

Показано, что конструкции Первой Стенки и Дивертора термоядерных реакторов ДЕМО и ТРТ подразумевают в качестве обращенного к плазме материала (ОПМ) использование вольфрама, а в качестве конструкционного – ферритно-мартенситную сталь с быстрым спадом наведенной активности (отечественная ЭК-181). Однако, их прямое соединение практически невозможно из-за значительных различий их физических свойств, в частности различных коэффициентов термического расширения (КТР), что может привести к возникновению больших остаточных напряжений во время охлаждения, и в результате к разрушению соединения.

Выявлено, что для решения задачи соединения вольфрама со сталью существует три группы методов: твердофазные (ГИП, СПС, др.), нанесение покрытий (VPS, APS), высокотемпературная пайка (порошковыми и ленточными припоями, контактно-реактивными слоями), в каждом из методов необходимо применение компенсирующих слоев. Наилучшими компенсирующими свойствами обладает медь, тантал и ванадий. При этом высокотемпературная пайка является наиболее перспективной за счет качества паяных швов, простоты и дешевизны метода, широким опытом ее применения при изготовлении компонентов ИТЭР. Паяные соединения при этом должны удовлетворять требованию малоактивируемости (иметь быстрый спад наведенной активности), термостойким, работоспособным в условиях агрессивной внешней среды.

Поэтому целью данной работы являлось: разработать метод получения неразъемного паяного соединения вольфрама с ферритно-мартенситной сталью ЭК-181, удовлетворяющего требованию малоактивируемости, термостойкости и совместимости с внешней агрессивной

средой для применения в элементах обращенных к плазме компонентов перспективных термо-ядерных установок.

Для достижения поставленной цели обоснована перспективность использования припоев систем Cu-Ti, Cu-Sn, Cu-Ge и Ti-Zr-Be.

Во второй главе представлены методики, использованные автором в работе. Приведен перечень материалов и припоев. Описаны методы исследования структурно-фазового состояния паяных соединений и взаимодействия паяных соединений с дейтерием и жидким литием. Представлены методики оценки механических характеристик паяных соединений и их термостойкости. Описаны методы мультифизического моделирования методом конечных элементов.

В качестве основных (паяемых) материалов в работе использовали сталь ЭК-181, чистый вольфрам спецификации ИТЭР. В качестве компенсирующих проставок применяли чистый ванадий и тантал.

В работе использовали припой в виде лент, которые получали с помощью технологии сверхбыстрого затвердевания расплава, толщина лент составляла величину 50-70 мкм.

Пайку проводили в шахтной вакуумной печи сопротивления СШВЛ-1.25/25 М в вакууме не ниже 10^{-5} мм.рт.ст, в специальных оснастках, при давлении 0,08 МПа или зажатии болтами, при температуре 1100 °С. Для сравнительных экспериментов медных припоев, время выдержки медных припоев составляло 20 мин. Для совмещения процесса пайки и термообработки стали, помимо режима 1100 °С, 20 мин (далее 1100/20) в работе использовали режим 1100 °С,

60 мин + 720 °С 180 мин (далее 1100/60 + 720/180), который соответствует режиму традиционной термообработки (ТТО) стали ЭК-181. Перечень образцов представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Перечень образцов

№	Сталь	Припой, мас. %	Проставка	Припой	ОПМ	Режим пайки, °С/мин	Обозначение
1	ЭК-181	99,9Cu	-	-	W	1100/20	W/Cu/ЭК
2	ЭК-181	99,9Cu	-	-	W	1100/60 + 720/180	
3	ЭК-181	Cu-28Ti	-	-	W	980/30	W/28Ti/ЭК
4	ЭК-181	Cu-50Ti	-	-	W	980/30	W/50Ti/ЭК
5	ЭК-181	Cu-50Ti	V	Cu-50Ti	W	1100/20	«50Ti»
6	ЭК-181	Cu-28Ti	V	Cu-50Ti	W	1100/20	«28Ti»
7	ЭК-181	Cu-28Ti	V	Cu-50Ti	W	1100/60 + 720/180	
8	ЭК-181	Cu-12Sn	V	Cu-50Ti	W	1100/20	«12Sn»
9	ЭК-181	Cu-12Sn-0,4P	V	Cu-50Ti	W	1100/20	«12Sn-0,4P»
10	ЭК-181	Cu-20Sn	V	Cu-50Ti	W	1100/20	«20Sn»
11	ЭК-181	Cu-20Sn	V	Cu-50Ti	W	1100/60 + 720/180	
12	ЭК-181	Cu-12Ge	V	Cu-50Ti	W	1100/20	«12Ge»
13	ЭК-181	Cu-25Ge	V	Cu-50Ti	W	1100/20	«25Ge»
14	ЭК-181	48Ti-48Zr-4Be	Ta	48Ti-48Zr-4Be	W	1100/60 + 720/180	«TiZr4Be»

Структурно-фазовый анализ паяных соединений проводили с помощью оптической и электронной микроскопии с применением энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии

(ЭДС) и дифракции отраженных электронов (ДОРЭ); дифракции синхротронного излучения, а также вторичной ионной масс-спектрометрии.

Механические свойства исследовали с помощью измерения микротвердости и предела прочности на срез. Термостойкость изучали путем термоциклических испытаний. Паяные соединения, полученные с использованием медных припоев, подвергали термоциклированию в интервале температур 25–700 °С на базе 50 циклов, режим выбран с учетом условий работы соединения НЕМJ дивертора. Термоциклические испытания паяного соединения «TiZr4Be» проводили в интервале температур 300–600 °С, 100 и 200 циклов. Режим выбран с учетом предполагаемых условий работы соединения вольфрам/сталь в водоохлаждаемой конструкции первой стенки реактора ДЕМО.

Исследование взаимодействия паяного соединения «TiZr4Be» с водородом проводили путем насыщения образцов и составных компонентов соединения в газовой фазе при 300 °С, 400 °С, 500 °С и 600 °С и давлении 1–10⁴ Па с последующим термодесорбционным анализом (ТДС). Также проводили облучение образцов в линейном плазмохимическом реакторе на основе пучково-плазменного разряда. Коррозионные испытания образцов паяного соединения проводили путем ампульных испытаний при изотермической выдержке в литии марки ЛЭ-1 при 600°С, время выдержки составило 100 ч.

Тепловые испытания макетов паяных соединений «TiZr4Be» проводили на электронно-лучевой установке "IDTF". Параметры испытаний: водяной поток на входе: 1 кг/с; температура воды на входе 50°С; плотность теплового потока: 2,5 МВт/м² - 4,5 МВт/м², длительность импульса – 20 с, пауза – 20 с.

В работе проводили расчеты методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния соединения W со сталью ЭК-181 при помощи ПО Ansys Workbench, расчет параметров тепловых испытаний проводили в COMSOL Multiphysics.

В третьей главе представлен анализ структуры и свойств соединений вольфрама и стали ЭК-181, паяных напрямую: W/Cu/ЭК и W/50Ti/ЭК; обосновано применения ванадия в качестве компенсирующей проставки; представлен анализ структуры и свойств соединений вольфрама со сталью ЭК-181, паяных через проставку из ванадия припоями с пониженным содержанием меди: «28Ti», «50Ti», «12Sn», «12Sn-0,4P», «20Sn», «12Ge», «25Ge», режим 1100/20. Представлено обоснование рекомендаций по применению соединения «28Ti», режим 1100/60+720/180, а также анализ структурно-фазового состояния данного соединения.

На рисунке 1 представлены результаты измерения пределов прочности на срез паяных соединений, полученных с использованием медных сплавов-припоев.

Наиболее прочной композицией является соединение, полученное с использованием чистой меди, которое имеет предел прочности на срез 260±40 МПа в исходном состоянии и 102±10 МПа в состоянии после 50 циклов термоциклирования в интервале температур 25–720°С.

Для снижения количества меди в паяном соединении предложены припои Cu-28Ti и Cu-50Ti ,мас.%. Было обнаружено, что в результате извлечения из оснастки образец W/28Ti/ЭК потерял целостность. В ходе механических испытаний паяного соединения W/50Ti/ЭК измерен предел прочности на срез, значение которого составило 126±20 МПа, но после термоциклических испытаний в интервале температур 25–720°С происходит образование крупных, ориентированных параллельно шву трещин со стороны W, что говорит о низкой термостойкости данного соединения

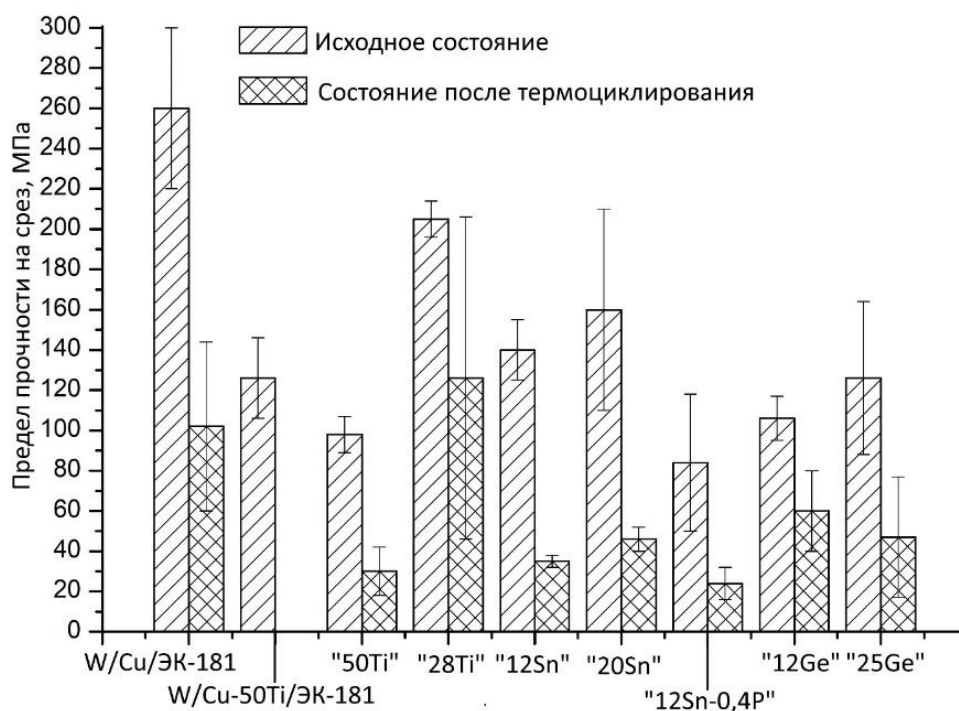


Рисунок 3.25 – Предел прочности на срез паяных соединений вольфрама со сталью ЭК-181, полученных с использованием медных сплавов-припоев

Для того, чтобы выявить оптимальный материал и толщину компенсирующей проставки, методом конечных элементов проведен анализ зависимости величины остаточных напряжений, формирующихся в результате охлаждения соединения после пайки с 1100 °С до 25 °С, от толщины проставки из V и Ta. На рисунке 2 представлены зависимости максимальных растягивающих и сжимающих напряжений от толщины проставки из V и Ta. Показано, что V эффективнее снижает возникающие напряжения, чем Ta. Оценена эффективность ванадиевой проставки, как производная от напряжения по толщине. Показано, что проставка толщиной 200 мкм не только позволяет получить при комнатной температуре напряжения меньше предела текучести, но и обладает наибольшей эффективностью в снижении напряжений в соединении W/V/ЭК-181.

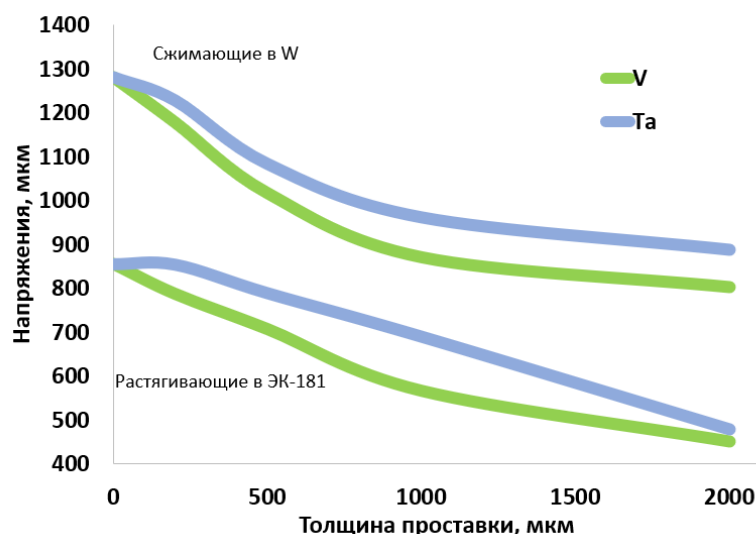


Рисунок 2 – Зависимость величины напряжений, возникающих в соединении W/проставка/ЭК-181 в процессе охлаждения с 1100 °С до комнатной температуры

Проведено сравнение микроструктуры и механических свойств соединений, полученных с использованием ванадиевой проставки и припоев с пониженной концентрацией меди: «12Ge», «25Ge», «12Sn», «12Sn-0,4P», «20Sn», «28Ti», «50Ti» (режим 1100/20).

Паяный шов V/Cu-50Ti/W в таких соединениях состоит из 3-х областей: 1 – чистый ванадий, 2 – механическая смесь фаз 42,5Cu-40,0Ti-17,5V, ат. % и 71,0V-23,2Ti-5,8Cu ат.%, последняя является следствием общей эрозии ванадия в расплаве припоя, 3 – чистый вольфрам. Профиль значений микротвердости по направлению от ванадия к вольфраму изменяется плавно.

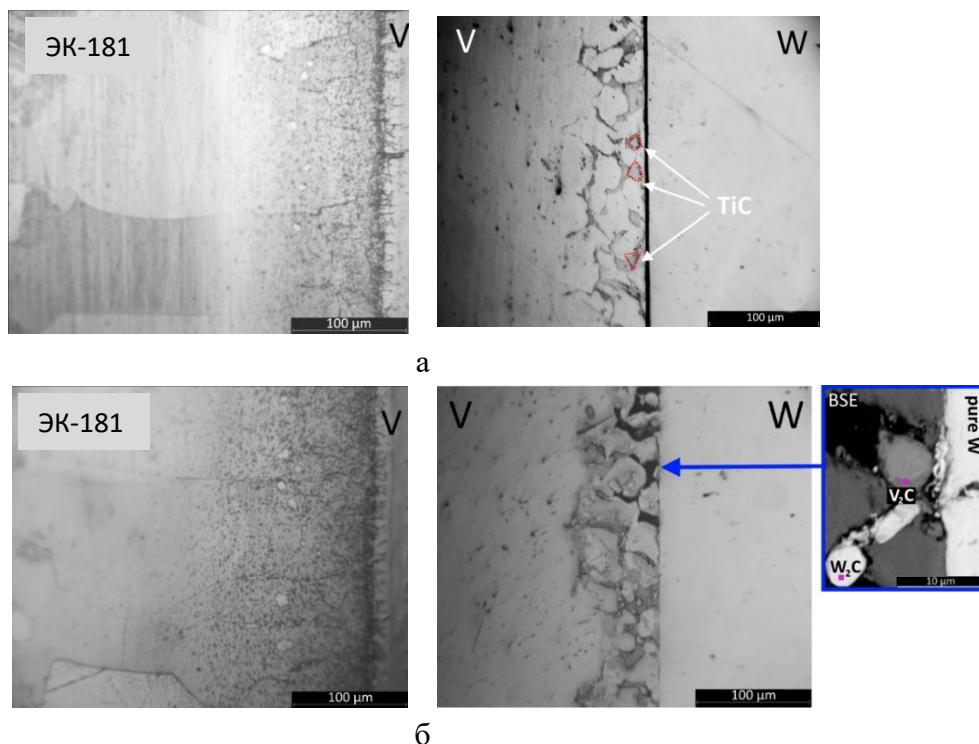
Показано, что паяные швы ЭК-181/V образцов «12Ge», «25Ge», «12Sn», «12Sn-0,4P», «20Sn», «28Ti», «50Ti» (режим 1100/20) имеют схожие черты и состоят из 5 характерных зон: 1 – сталь в ферритно-мартенситном состоянии ферритно-мартенситная область стали; 2 – зона крупных ферритных зерен; 3 зона существования сигма-фазы σ (Fe, V). Зона 4 – зона с наличием карбидов ванадия. Зона 5 – чистый ванадий. Отличительной чертой образца «20Sn» является отсутствие фазы σ (Fe, V) в центре образца, ее наблюдали только вблизи галтелей. Отличительной чертой паяных соединений «28Ti» и «50Ti» является образование множественных преципитат карбидов титана, причем в соединении «50Ti» их количество больше, что негативно сказывается на прочности соединения. Все соединения выдержали термоциклику в интервале 25–720°C, но после 50 циклов структуры паяных швов V/Cu-50Ti/W начинают деградировать.

Для дальнейших исследований, направленных на выбор оптимальной композиции, которая может быть использована при совмещении процессов пайки со штатным режимом термообработки стали ЭК-181, были выбраны соединения «28Ti» и «20Sn». Представлен сравнительный анализ микроструктуры и механических свойств данных соединений, полученных в результате пайки по температурно-временному режиму, соответствующему термообработке стали ЭК-181: 1100/60+720/180.

Показано, что для получения надежного паяного соединения стали ЭК-181 с вольфрамом с использованием припоев с пониженным содержанием меди, может применяться соединение «28Ti». Предел прочности такого соединения на срез составляет 173 ± 25 МПа в исходном состоянии и 50 ± 8 МПа после термоциклических испытаний в интервале 25–720°C (50 циклов).

Для более детального уточнения структурно-фазового состояния паяного соединения «28Ti» (1100/60+720/180) проведен ДОРЭ анализ и анализ рентгеновской дифракции с помощью источника синхротронного излучения (СИ). На рисунке 3 представлена микроструктура данного паяного соединения в исходном и термоциклированном состоянии.

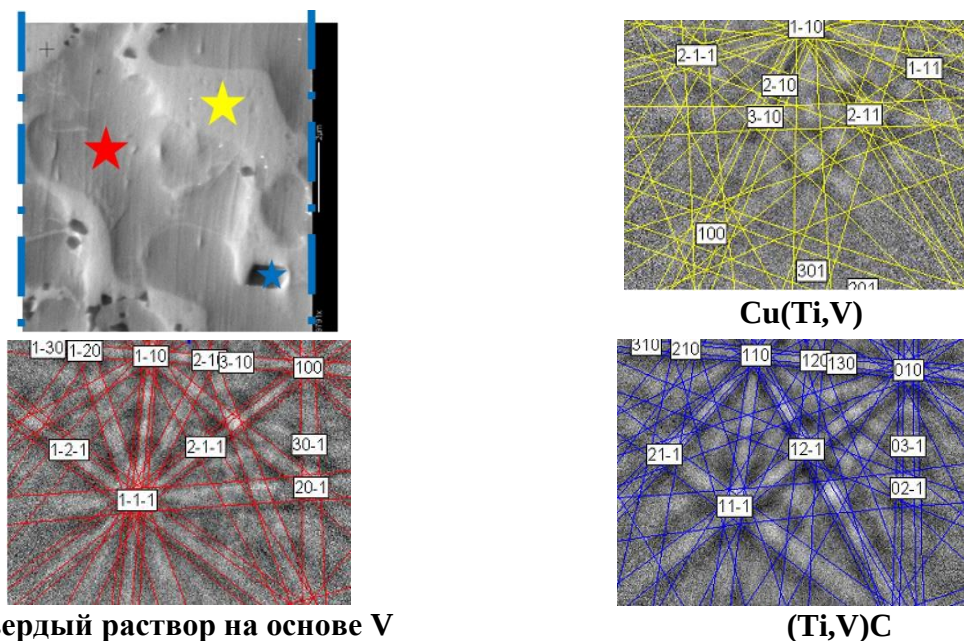
Было установлено, что паяный шов V/Cu-50Ti/W состоит из следующих фаз: V, W, W_2C , V_2C , TiC, CuTi, Cu_3Ti_2 , Cu_4Ti . Однако некоторые пики на дифракционных спектрах СИ между 31° и 34° не были идентифицированы, что может говорить о формировании дополнительных фаз.



a – исходное состояние, *б* – состояние после 50 циклов термоциклирования в интервале 25-720°C

Рисунок 3 – Микроструктура поперечного сечения паяного соединения «28Ti», режим 1100/60+720/180

На рисунке 4, при данной разрешающей способности РЭМ представлено увеличенное изображение характерной области паяного шва W/Cu-50Ti/V. Фаза, выделенная желтым маркером, идентифицируется, как CuTi, при этом анализ ЭДС также показывает наличие ванадия в данной области в количестве 17,6 ат. %, что может свидетельствовать о наличии твердого раствора замещения Cu(Ti,V). Фаза, выделенная красным маркером, имеет кристаллическую решетку ОЦК-ванадия, с растворенными титаном и медью. Согласно ЭДС анализу, в данной области содержится V-10-20Ti-3-5 Cu ат.%.

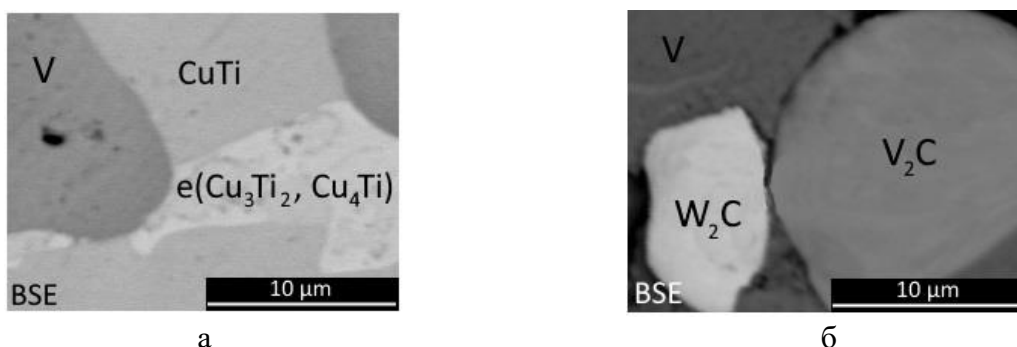


Твердый раствор на основе V

(Ti,V)C

Рисунок 4 – ДОРЭ анализ зоны шва W/Cu-50Ti/V паяного соединения «28Ti», режим 1100/60+720/180 (цвет маркера соответствует цвету линий Киккучи)

Интерметаллиды системы Cu-Ti (Cu_4Ti , Cu_3Ti_2) также наблюдали на РЭМ-изображениях, которые представлены на рисунке 5. Можно выделить две структурные составляющие на основе системы Cu-Ti: № 1 — со средним составом 54 Cu-32 Ti-14 V ат. % и дифракционными линиями Киккучи, идентифицирующими CuTi и № 2 с 72 Cu-24 Ti-4 V ат. %. В области № 2 не было получено четких линий Киккучи, при этом трехкомпонентной фазы Cu-Ti-V не существует, значит, V замещает Ti в решетке Cu-Ti. Сопоставляя результат с дифракционными спектрами синхротронного излучения, данная область соответствует тонкодисперсной эвтектоидной смеси $e(\text{Cu}_3\text{Ti}_2, \text{Cu}_4\text{Ti})$.



a – центр образца; *б* – область вблизи галтели с изображением морфологии карбидов ванадия и вольфрама

Рисунок 5 – Увеличенное изображение характерных областей паяного шва W/Cu-50Ti/V соединения «28Ti», режим 1100/60+720/180

По данным дифракции СИ, обнаружены карбиды трех типов: W_2C , V_2C , TiC. Фаза TiC, показанная на 4 синим маркером, имеет широкий диапазон гомогенности и средний состав 65Ti-30Cu-5V-Cu ат.%. Фазы V_2C и W_2C , показанные на рисунке 5 б, наблюдали в виде кластеров и были обнаружены в непосредственной близости к галтели.;

С помощью анализа дифракции СИ, ДОРЭ и ЭДС анализов установлено, что паяный шов ЭК-181/Cu-28Ti/V соединения «28Ti» (режим 1100/60+720/180) состоит из следующих фаз: V, $\alpha\text{-Fe}$, Cu, TiC, $\sigma(\text{Fe}, \text{V}, \text{Cr})$, TiVC_2 , V_6C_5 , V_2C , Cu_3Ti_2 . На рисунке 6 представлена микроструктура данного соединения.

Фаза $\sigma(\text{Fe}, \text{V})$ по ЭДС имеет состав 60Fe-20Cr-20V ат.%. С учетом того, что она изоструктурна фазе $\sigma(\text{Fe}, \text{Cr})$, для данного паяного шва может быть записана, как $\sigma(\text{Fe}, \text{V}, \text{Cr})$. Как уже упоминалось, отличительной особенностью соединений, полученных с использованием припоев системы Cu-Ti, является наличие карбидов титана в шве; однако с помощью ДОРЭ анализа удалось также установить наличие карбида TiVC_2 . Согласно дифракции СИ также установлено наличие V_2C и V_6C_5 , однако при ДОРЭ анализе не было получено четких линий Киккучи, подтверждающих наличие данных фаз.

Со стороны стали (слева от $\sigma(\text{Fe}, \text{V}, \text{Cr})$, рисунок 6) выявлено образование только TiC с составом: 65Ti-30Cu-5V-Cu ат.%. TiC образовывался в виде мелких преципитат внутри зерен αFe и Cu. Со стороны V (справа от $\sigma(\text{Fe}, \text{V}, \text{Cr})$) образовались, как TiVC_2 , так и TiC. Карбиды ванадия и титана имеют различную морфологию. Карбиды ванадия имеют вытянутую форму, они образовались преимущественно вблизи Cu. Карбиды TiC имеют форму близкую к квадрату, они образовались непосредственно внутри карбидов ванадия.

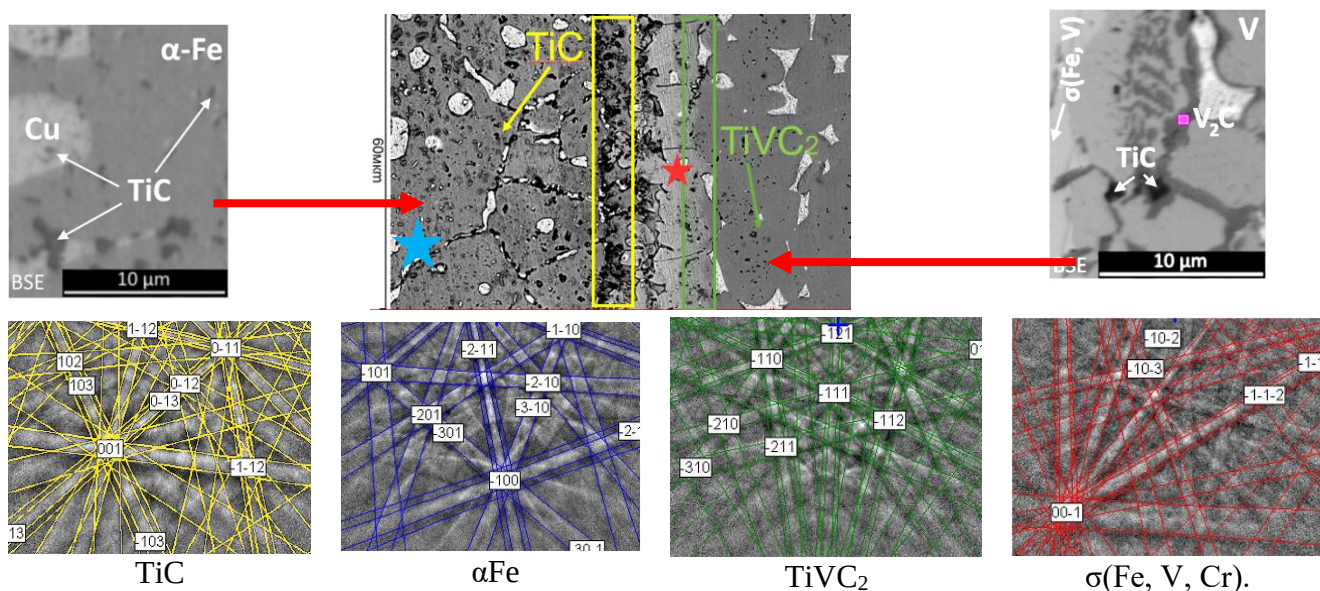


Рисунок 6 – ДОРЭ анализ паяного шва V/Cu-28Ti/ЭК-181 соединения «28Ti», режим 1100/60+720/180

Для оценки влияния режима пайки 1100/60+720/180 на механические свойства соединения «28Ti» проводили испытания на срез до и после термоциклирования в интервале температур 25–720°C.

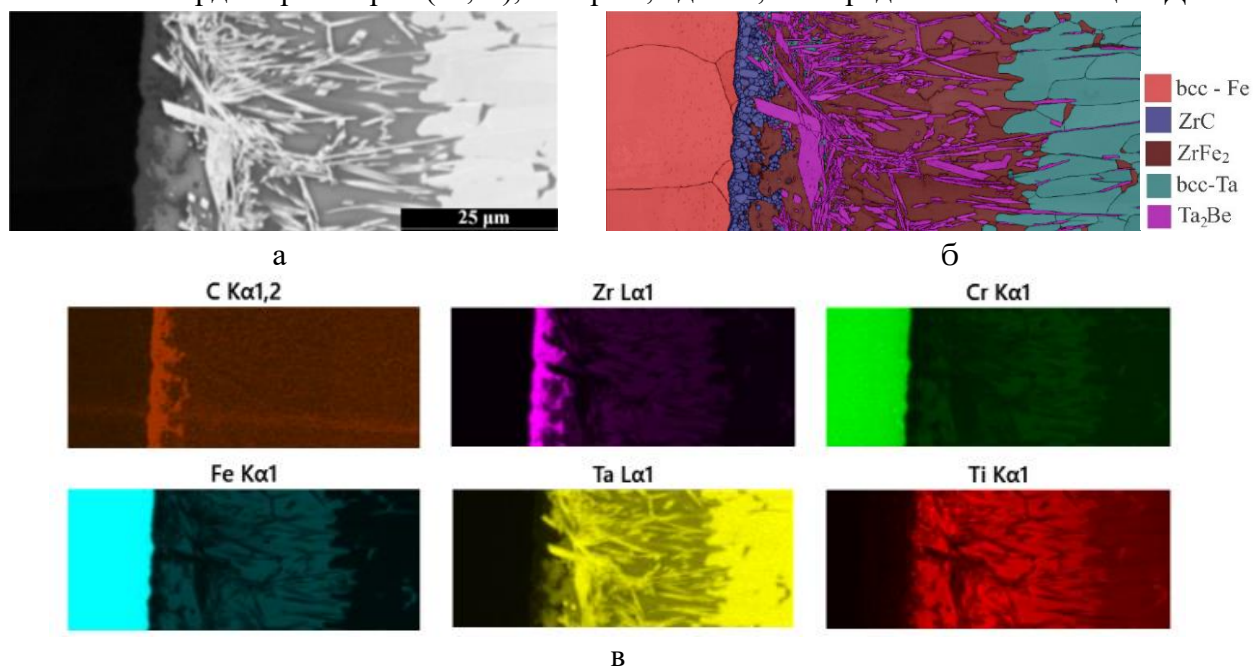
Предел прочности на срез в исходном состоянии составляет 173 ± 25 МПа, что в пределах погрешности совпадает со значением, полученным при режиме пайки 1100/20 – 205 ± 12 МПа, хотя абсолютное значение ниже на 15%. Предел прочности после термоциклирования составляет 50 ± 8 МПа, что ниже прочности соединения, полученного по режиму 1100/20 – 126 ± 40 МПа. Как до, так и после термоциклирования разрушение образцов начиналось с W (спектр 1), переходило к паяному шву V/W (спектр 2), затем к ЭК-181/V (спектр 3). Причем, большая интенсивность титановых пиков в спектрах 3 говорит о том, что разрушение проходило по карбиду титана. В образце после термоциклирования также выделен спектр 4, в котором обнаружено меньше меди, чем в спектре 3, о чем говорит низкая интенсивность медных пиков.

Установлено, что после 50 термоциклов происходит деградация микроструктуры шва, аналогичное тому, что происходит при пайке по режиму 1100/20 мин: на границе ЭК-181/V структурно-фазовых изменений не выявлено; в паяном шве V/Cu-50Ti/W обнаружены дефекты, как в центре, так и в галтельных участках (выделено синими эллипсами на рисунке). Было обнаружено, что дефекты (выкрашивания) появляются вблизи частиц V_2C и W_2C .

В четвертой главе предложен подход, направленный на решение задачи соединения вольфрама со сталью с применением высокотемпературной пайки малоактивируемыми припоями. Для этого в качестве припоя предложен быстрозакаленный сплав-припой 48Ti-48Zr-4Be мас.%. В качестве компенсирующей проставки предложено использовать фольгу из тантала. В данной главе отображены результаты исследования структуры и механических свойств паяного соединения «TiZr4Be», режим пайки 1100/60+720/180.

С помощью электронной микроскопии, анализа дифракции СИ, ДОРЭ и ЭДС анализов установлено, что паяный шов ЭК-181/TiZr4Be/Та состоит из фаз: αFe , γFe , Ta_2Be , ZrC , $(Zr, Ti)_2(Fe, Cr, Ta)$, $\alpha(Ta, Ti)$, TiC , $\alpha(Zr, Ti)$. На рисунке 7 представлены результаты электронной микроскопии. Фаза ZrC образовалась на границе раздела $\alpha Fe/ZrFe_2$, толщина обнаруженной

фазы варьируется в пределах 2-10 мкм. Фаза Ta_2Be формируется в виде «острых игл» внутри $(Zr,Ti)_2(Fe,Cr,Ta)$. Однако, количество таких образований различно вдоль линии шва, что может быть связано с неравномерным зазором между основными материалами при пайке. ЭДС анализом установлено, что фаза Zr_2Fe растворяет в себе Ti , Cr , Ta , поэтому может быть записана, как $(Zr,Ti)_2(Fe,Cr,Ta)$. Правее от $(Zr,Ti)_2(Fe,Cr,Ta)$ сформировались вытянутые зерна оцк твердого раствора $\alpha(Ta,Ti)$. Согласно картам ЭДС анализа, можно сделать предположение, что в процессе пайки произошло сильное взаимодействие между припоем, сталью и танталом, что привело к эрозии тантала. С помощью дифракции СИ установлено наличие TiC , которые образуются предположительно в виде преципитат в области ферритных зерен. Кроме того, выявлено наличие ГПУ твердого раствора $\alpha(Zr,Ti)$, который, однако, не определяется с помощью ДОРЭ.

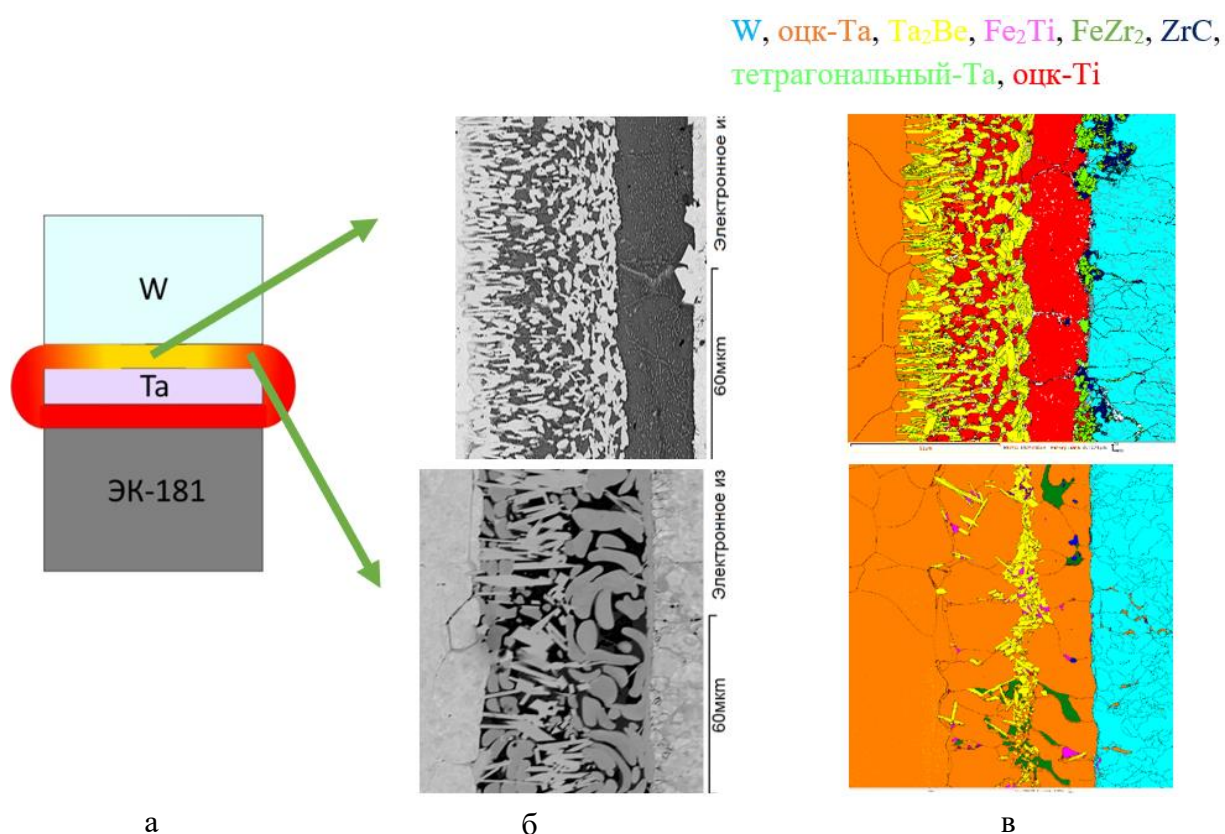


a – изображение в обратно-отраженных электронах; b – ДОРЭ карты распределения фаз; $в$ – ЭДС карты распределения химических элементов

Рисунок 7 – Результат структурно-фазового анализа паяного шва $Ta/TiZr_4Be/ЭК-181$ соединения « $TiZr_4Be$ », режим 1100/60+720/180

Проведен ДОРЭ и ЭДС анализ паяного шва $Ta/TiZr_4Be/W$ соединения « $TiZr_4Be$ », режим 1100/60+720/180. На рисунке 8 представлены РЭМ изображения и ДОРЭ карты распределения фаз. Установлено, что в процессе пайки припой смачивает всю поверхность танталовой пластины, что может приводить к возникновению контакта расплавов из зазоров со стороны стали и вольфрама. Это приводит к смешиванию расплавов, что схематично изображено на рисунке 8а. Если смешивание не происходит (в первую очередь в центральной части образца), образуется микроструктура, представленная на рисунке 8б сверху. Если происходит (в первую очередь в галтельных участках), то образуется микроструктура, представленная на рисунке 8б снизу. Установлено, что в образцах с площадью пайки 5x5 мм происходит полное перемешивание расплавов, а в образцах площадью более 7x7 мм, смешивание происходит только в галтельных участках.

При отсутствии смешивания паяный шов $Ta/TiZr_4Be/W$ состоит из фаз αTa , αW , Ta_2Be , $\alpha(Ta,Ti)$, $\beta(Ti, Zr, Ta)$, ZrC , TiC , TaC ; $\beta(Ta,W)$. При смешивании расплавов паяный шов $Ta/TiZr_4Be/W$ состоит из фаз: αTa , αW , Ta_2Be , $\alpha(Ta,Ti,Zr,W,Fe)$, βTi , ZrC , TiC , TaC , αZr , $(Ti,Zr)(Ta,Fe)_2$.

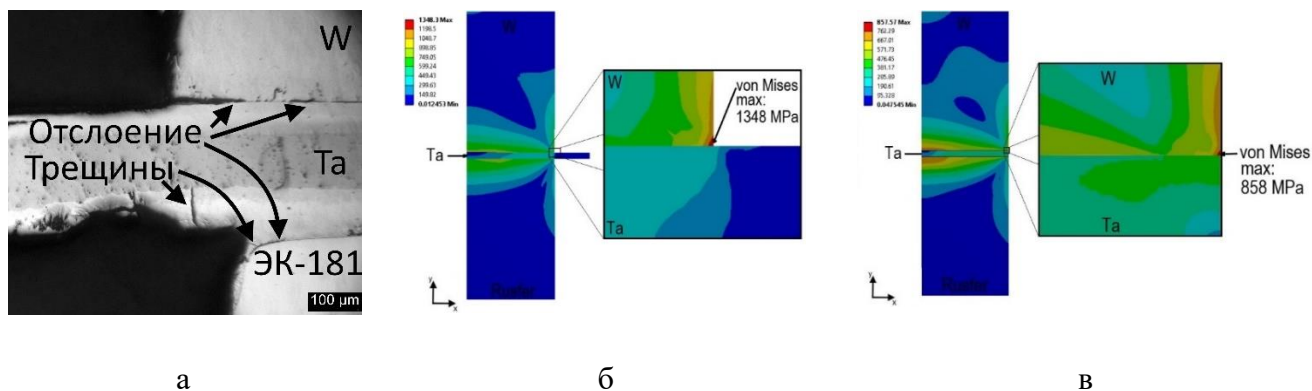


а – схематичное изображение взаимодействия расплавов в зазорах; *б* – микроструктура и ДОРЭ карта распределения фаз в случае, когда не происходит смешивание расплавов со стороны стали и вольфрама; *в* – микроструктура и ДОРЭ карта распределения фаз в случае, когда происходит смешивание расплавов со стороны стали и вольфрама;

Рисунок 8 – Результаты структурно-фазового анализа паяного шва Ta/TiZr4Be/W соединения «TiZr4Be», режим 1100/60+720/180

Прочность паяного соединения не зависит от структуры паяного шва Ta/TiZr4Be/W и составляет 118 ± 28 МПа в исходном состоянии и 116 ± 20 МПа после 100 термических циклов в интервале 300–600°C ($V_{\text{нагрев}} = 5$ °C/мин, $V_{\text{охлаждение}} = 2$ °C/мин). Разрушение паяного соединения происходит вдоль иглообразной фазы Ta₂Be в шве ЭК-181/TiZr4Be/Ta.

Обнаружено, что в обоих случаях образцы после термоциклических испытаний оставались целостными, однако, в области галтельных участков были обнаружены трещины и отслоения, как показано на рисунке 9а. Для оценки влияния геометрии танталовой проставки был проведен расчет эквивалентных напряжений по Мизесу методом конечных элементов. На рисунке 9 представлено распределение напряжений по Мизесу: б – длина тантала превышает длину вольфрама и стали, в – длина тантала совпадает с длиной вольфрама и стали. Расчет показал, что в случае в напряжения ниже почти на 40% по сравнению со случаем а). Исходя из этого рекомендовано использовать компенсирующую проставку из тантала того же сечения что и вольфрам.



а – микрофотография паяного соединения в области галтельного участка после 100 термических циклов в интервале 300-600°C,

Распределение остаточных напряжений по Мизесу:

б – длина тантала превышает длину вольфрама и стали

в – длина тантала совпадает с длиной вольфрама и стали

Рисунок 9 – Оценка влияния геометрии компенсирующей проставки из тантала в паяных соединениях «TiZr4Be». Микрофотография паяных соединений. Распределение остаточных напряжений по Мизесу в композиции вольфрам/тантал/ЭК-181

В пятой главе проведено исследование взаимодействия паяного соединения «TiZr4Be», режим 1100/60+720/180 с дейтерием, литием, а также представлены результаты тепловых испытаний макетов ОПК на основе данного соединения.

Результаты исследования влияния дейтерия на механические свойства паяного соединения представлены в таблице 2. Паяное соединение является чувствительным к изотопам водорода, однако может эксплуатироваться без разрушения при давлении газа ≤ 1 Па и температуре ≥ 300 °C, а также при более высоких давлениях (≤ 100 Па) при температуре $T \geq 600$ °C. Прочность паяного соединения при этом падает не более, чем на 30%. С помощью ВИМС выявлено, что при насыщении в среде дейтерия при 300°C захват дейтерия осуществляется преимущественно за счет фазы Ta_2Be и частично за счет $\beta(Ta, Ti)$. При 600°C захват осуществляется преимущественно за счет $\beta(Ta, Ti)$, также возможно формирование гидрид $Be_2ZrH_{0,56}$.

Для анализа захвата дейтерия была проведена серия экспериментов в условиях плазменного воздействия, идентичному условиям работы первой стенке ДЕМО. Все образцы сохранили свою прочность после плазменного воздействия. Время облучения варьировалось от 2 до 16 часов при одинаковом флаксе $\approx 1,2 \times 10^{21}$ D/м²с. Был сделан вывод, что основным источником дейтерия в образцах является окружающий газ и влияния плазмы не выявлено.

Таблица 2 – Результаты механических испытаний и ТДС анализа паяного соединения «TiZr4Be», режим 1100/60+720/180 после взаимодействия с дейтерием из газовой фазы и плазмы

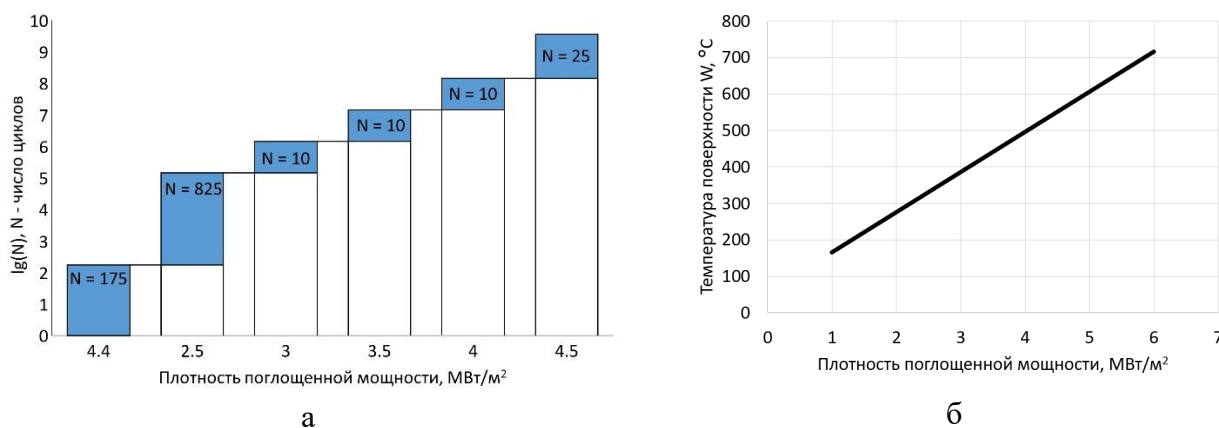
Т, °C	Давление, Па	Предел прочности на срез, МПа	Захват дейтерия, 10^{22} D/м ² ТДС	Отношение D/Me, ат. % ТДС
Исходное состояние		118±28		
300 отдельно	10000	-	6,1±1,2	-
600 отдельно	10000	-	550±50	-
300	10000	разрушение	-	-
600	10000	разрушение	-	-
300	100	разрушение	-	-
600	100	86±27	30±6	1,65±0,35
300	1	80±16	20±4	1,1±0,2
600	1	80±30	2,8±0,5	0,16±0,03
600 (5ч в плазме)	1	-	2,3±0,4	0,13±0,03

Установлено, что паяное соединение «TiZr4Be» является коррозионностойким в жидком литии при температуре 600°C в течение 100 ч. Коррозионная стойкость всего паяного соединения определяется коррозионной стойкостью паяного шва Ta/TiZr4Be/ЭК-181, т.к. в галтельных участках формируется микроструктура характерная для данного шва. В данном паяном шве не наблюдается растворения, но на поверхности образуются кристаллы на основе хрома и железа.

В паяном шве W/TiZr4Be/Ta, как в случае смешивания расплавов припоев со стороны стали и вольфрама, так и при отсутствии смешивания, на границе раздела вольфрам/паяный шов наблюдается растворение карбидов ZrC и фазы β Ta. На границе раздела паяный шов/тантал – растворение α (Ta, Ti) по границам зерен α Ta.

Представлены результаты испытаний интенсивными тепловыми потоками разработанного элементарного макета на основе паяного соединения «TiZr4Be» и анализ стойкости паяного соединения к таким нагрузкам.

Тепловые испытания состояли из 6 шагов, что показано на рисунке 10 а: 175 циклов на 4,5 МВт/м², 825 циклов на 2,5 МВт/м², далее повышение мощности до 4,5 МВт/м² с шагом 0,5 МВт/м², каждый по 10 циклов, на последнем этапе проводили нагружение макета до разрушения при 4,5 МВт/м². Всего макет испытал 1055 циклов теплового нагружения. Зависимость температуры поверхности вольфрама от плотности поглощенной мощности представлена на рисунке 10 б.



а – гистограмма количества циклов б – температура поверхности вольфрама,

Рисунок 10 – Зависимость экспериментальных параметров от плотности поглощенной мощности

Разрушение макета произошло на 26-ом цикле при 4,5 МВт/м². На рисунке 11 представлен цикл теплового нагружения в координатах «температура поверхности вольфрама – время». В процессе нагружения температура поверхности была близка к 550°C, что хорошо согласуется с расчетом МКЭ. Разрушение макета зафиксировали по увеличению температуры до 1300°C (предел измерения пирометра), что показано на рисунке 11. Разрушение макета произошло между сталью и танталом по Лавес-фазе (Zr,Ti)₂(Fe,Cr,Ta).

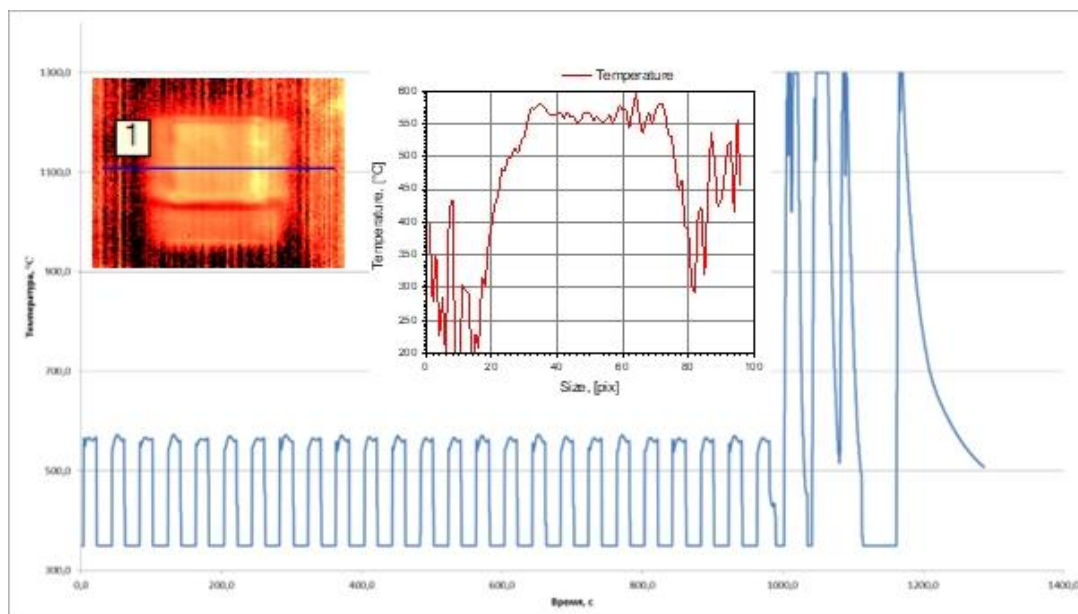


Рисунок 11 – Цикл теплового нагружения при $4,5 \text{ МВт/м}^2$

Результаты тепловых испытаний показали, что паяное соединение «TiZr4Be», режим 1100/60+720/180 является перспективным для изготовления компонентов ОПК будущих термоядерных установок, таких, как ДЕМО и ТРТ.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Для получения термостойкого в интервале температур 20–720 °С паяного соединения вольфрама со сталью ЭК-181 предложено использование V в качестве компенсирующей проставки и припоев с пониженным содержанием меди: Cu-28Ti для соединения V/ЭК-181 и Cu-50Ti для соединения V/W (мас.%). Причем, для сохранения свойств стали ЭК-181 предложено совместить процесс пайки с традиционным режимом термообработки данной стали – пайка при 1100 °С в течение 60 мин, охлаждение до комнатной температуры, отжиг при 720 °С в течение 180 мин. Предел прочности такого соединения на срез составляет 173 ± 25 МПа в исходном состоянии и 50 ± 8 МПа после 50 термических циклов в интервале температур 20–720 °С.

2. Установлено, что паяный шов ЭК-181/Cu-28Ti/V состоит из αV , αFe , Cu, TiC, $\sigma(Fe, V, Cr)$, $TiVC_2$, V_6C_5 , V_2C , Cu_3Ti_2 , паяный шов W/Cu-50Ti/V состоит из: αV , αW , $\alpha(V, Ti, Cu)$, W_2C , V_2C , TiC, $Cu(Ti, V)$, $e(Cu_3Ti_2, Cu_4Ti)$;

3. Впервые предложен метод получения неразъемного паяного соединения вольфрама с ферритно-мартенситной сталью ЭК-181, заключающийся в использовании композиции 48Ti-48Zr-4Be мас.% (TiZr4Be) в качестве малоактивируемого припоя и применении компенсирующей проставки из Ta. Предложенный температурно-временной режим пайки также соответствует традиционному режиму термообработки для стали ЭК-181. Показано, что данное соединение является термостойким в интервале 300–600 °С (200 циклов), прочность на срез паяного соединения составляет 118 ± 28 МПа в исходном состоянии и 116 ± 20 МПа после 100 термоциклических циклов.

4. Установлено, что паяный шов ЭК-181/TiZr4Be/Ta состоит из: αFe , γFe , Ta_2Be , ZrC, $(Zr, Ti)_2(Fe, Cr, Ta)$, $\alpha(Ta, Ti)$, TiC $\alpha(Zr, Ti)$. В паяном шве Ta/TiZr4Be/W формируется различное структурно-фазовое состояние в зависимости от смешивания расплавов припоев из зазоров со стороны стали ЭК-181 и вольфрама:

- при отсутствии смешивания расплавов: αTa , αW , Ta_2Be , $\alpha(Ta, Ti)$, $\beta(Ti, Zr, Ta)$, ZrC, TiC, TaC, $\beta(Ta, W)$;

- при смешивании расплавов: αTa , αW , Ta_2Be , $\alpha(Ta, Ti, Zr, W, Fe)$, βTi , ZrC, TiC, TaC, αZr , $(Ti, Zr)(Ta, Fe)_2$.

5. Установлено, что паяное соединение W/TiZr4Be/Ta/TiZr4Be/ЭК-181 может эксплуатироваться без разрушения при давлениях газообразного дейтерия ≤ 1 Па и температурах ≥ 300 °С, а также при давлениях ≤ 100 Па и температурах $T \geq 600$ °С. Причем во всех случаях прочность паяного соединения снижается не более, чем на 30% от исходного значения.

6. Установлено, что паяное соединение W/TiZr4Be/Ta/TiZr4Be/ЭК-181 является коррозионностойким в жидком литии при температуре 600 °С в течение 100 ч выдержки. Значительных изменений в структурно-фазовом состоянии паяного шва в приграничных с литием областях не выявлено.

7. Разработан, изготовлен и испытан на стенде IDTF (АО «НИИЭФА») макет обращенного к плазме компонента на основе паяного соединения W/TiZr4Be/Ta/TiZr4Be/ЭК-181. Определено, что до разрушения макет выдержал 1055 циклов теплового воздействия при плотностях поглощенной мощности в интервале $2,5 \text{ МВт/м}^2 - 4,5 \text{ МВт/м}^2$.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Deuterium retention in the elements of plasma facing components for the DEMO first wall / Gasparyan Y., Bachurina D., Efimov V., et.al // Journal of Nuclear materials. 2022. Т. 567 567, № 153837
2. Влияние дейтерия на фазовый состав малоактивируемого припоя TiZr4Be / Бачурина Д.М., Сучков А.Н., Козлов И.В. и др. // В сборнике: ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ. Материалы XXV конференции. Москва, 2022. С. 89-91.
3. Joining tungsten with steel for DEMO: simultaneous brazing by cu-ti amorphous foils and heat treatment / Bachurina D., Suchkov A., Gurova J., et.al. // Fusion Engineering and Design. 2021. Т. 162. С. 112099.
4. NRNU MEPhI activity towards fusion-fission hybrid systems / Gasparyan Yu.M., Bachurina D.M., Begrambekov L.B., et.al. // Problems of Atomic Science and Technology, Ser. Thermo-nuclear Fusion. 2021. Т. 44. № 2. С. 158-159.
5. Overview of the mechanical properties of tungsten/steel brazed joints for the DEMO fusion reactor / Bachurina D., Vorkel V., Suchkov A., et.al. // Metals. 2021. Т. 11. № 2. С. 1-11.
6. Brazing tungsten/tantalum/RAFM steel joint for demo by fully reduced activation brazing alloy 48Ti-48Zr-4Be / Bachurina D., Suchkov A., Gurova J., et.al. // Metals. 2021. Т. 11. № 9.
7. Высокотемпературная пайка быстрозакаленными сплавами-припоями вольфрама и стали элементов конструкции первой стенки реактора DEMO / Бачурина Д.М., Сучков А.Н., Гурова Ю.А., Севрюков О.Н. // В сборнике: Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. Материалы Третьей международной конференции. Под редакцией В. К. Драгунова. 2020. С. 231-242.
8. Investigation of a brazed joint EK-181/V/W obtained by Cu-Sn and Cu-Ti amorphous foils / Bachurina D., Suchkov A., Gurova Y., Sevryukov O. // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 17. Сер. "17th International School-Conference "New Materials: Advanced Technologies"" 2020. С. 012010.
9. Исследование СФС паяного соединения стали с вольфрамом через Та и ленточный припой Ti-Zr-4Be / Гурова Ю.А., Сучков А.Н., Бачурина Д.М., Севрюков О.Н. // В книге: Новые материалы и перспективные технологии. Сборник материалов Шестого междисциплинарного научного форума с международным участием. 2020. С. 89-93.
10. Высокотемпературная пайка быстрозакаленными сплавами-припоями вольфрама и стали элементов конструкции первой стенки реактора DEMO / Бачурина Д.М., Сучков А.Н., Гурова Ю.А., Севрюков О.Н. // Сварочное производство. 2020. № 5. С. 21-27.
11. Разработка сплавов-припоев для высокотемпературной пайки малоактивируемой стали с вольфрамом дивертора и первой стенки термоядерного реактора DEMO / Бачурина Д.М., Сучков А.Н., Севрюков О.Н. и др. // В сборнике: Взаимодействие плазмы с поверхностью. Сборник научных трудов. 2019. С. 23.
12. High-temperature brazing of tungsten with steel by Cu-based ribbon brazing alloys for DEMO / Bachurina D., Suchkov A., Filimonov A., et.al. // Fusion Engineering and Design. 2019. Т. 138.
13. Обоснование выбора составов сплавов-припоев для высокотемпературной пайки ЭК-181/ванадий/вольфрам в конструкциях термоядерного реактора DEMO / Сучков А.Н., Бачурина Д.М., Федотов И.В. // В сборнике: Пайка-2018. Сборник материалов международной научно-технической конференции. 2018. С. 218-220.
14. Механические характеристики паяных соединений ферритно-мартенситная сталь/вольфрам, полученных с использованием медных сплавов-припоев / Бачурина Д.М., Филимонов А.А., Федотов И.В. и др. // В сборнике: Прочность неоднородных

структур - ПРОСТ 2018. Сборник трудов IX-ой Евразийской научно-практической конференции. 2018. С. 52.

15. Исследование влияния режимов пайки на напряженно-деформированное состояние соединения феррито-мартенситной стали ЭК-181 с вольфрамом / Федотов И.В., Бачурина Д.М., Сучков А.Н. // В книге: четвертый междисциплинарный научный форум с международным участием "Новые материалы и перспективные технологии". 2018. С. 329.
16. Joining of tungsten with low-activation ferritic–martensitic steel and vanadium alloys for DEMO reactor / Bachurina D., Suchkov A., Kalin B., Sevriukov O., Fedotov I., Dzhumaev P., Ivannikov A., Leont'eva-Smirnova M., Mozhanov E. // Nuclear Materials and Energy. 2018. T. 14. С. 135-142.