

На правах рукописи

Конев Алексей Николаевич

**Адгезионное взаимодействие в многослойных
металлокерамических структурах
жидкометаллического blankets термоядерного
реактора**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

г. Орёл – 2012

Работа выполнена в *ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК»*, г.Орел.

| | |
|------------------------|--|
| Научный руководитель | <i>доктор технических наук, старший научный сотрудник Витковский Иван Викторович</i> |
| Официальные оппоненты: | <i>Баранов Виктор Леопольдович доктор технических наук, профессор ТулГУ, г.Тула, Головешкин Василий Адамович доктор технических наук, профессор, МГУПИ, Москва</i> |
| Ведущая организация | <i>ФГУП ГНПП «Слав», г.Тула</i> |

Защита состоится 30 мая 2012 года в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета *Д212.182.03* созданного на базе *ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»*, г.Орел, расположенном по адресу: *302020 г.Орел, Наугорское шоссе, д.29.*

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке *ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК»*.

Объявление о защите диссертации и автореферат размещены на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации по адресу: *http://mon.gov.ru* и на сайте Госуниверситета – УНПК по адресу: *http://gu-unpk.ru*.

Автореферат разослан __апреля 2012.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Борзенков Михаил Иванович

Общая характеристика работы

Актуальность темы

К первоочередным трудноразрешимым задачам практической реализации идеи термоядерного синтеза относится проблема создания жидкометаллического blankets - устройства, предназначенного для первичного теплосъема и передачи энергии в термоядерном реакторе (ТЯР). Наиболее перспективной конструкцией blankets для промышленного термоядерного реактора является литиевый самоохлаждаемый blankets.

Одним из препятствий создания такого blankets является отсутствие решения задачи по уменьшению тормозных усилий магнитогидродинамических (МГД) потерь, препятствующих движению жидкометаллического теплоносителя в проточном тракте blankets.

Усилия ученых из США, России, Европы, Японии по разработке способов уменьшения МГД-потерь давления в самоохлаждаемых жидкометаллических blankets пока не привели к практическому решению, удовлетворяющему всем необходимым требованиям. Анализ полученных к настоящему времени результатов приводит нас к выводу, что самовосстанавливающиеся покрытия и керамические изоляторы не решают проблему из-за пористой структуры покрытий и наличия технологических окислов металлов в керамике, ухудшающих их стойкость в жидкометаллическом теплоносителе.

В НИИЭФА им. Д.В. Ефремова проблему уменьшения МГД-потерь давления предложено решать путем применения многослойных металлокерамических электроизоляционных барьеров на границе жидкий металл/конструкционный материал, представляющего многослойную металлокерамическую стенку проточного тракта, позволяющую увеличить сопротивление замыканию индуктированных в жидком металле токов, и следовательно, уменьшить влияние МГД-сил, тормозящих движение жидкого металла.

Такая конструкция представляет слоистую структуру типа металл-керамика, формируемую методами вакуумно-дугового осаждения и диффузионной сварки.

Проведенный анализ свидетельствует, что проблема создания такого проточного тракта, отвечающего всем необходимым требованиям, во многом связана с отсутствием методов расчета адгезионного взаимодействия в слоистых структурах и технологии их формирования.

Таким образом, исследование адгезионного взаимодействия в многослойных металлокерамических структурах жидкометаллического blankets термоядерного реактора в настоящее время является весьма актуальным.

Работа выполнялась в развитие Международной программы по созданию международного экспериментального термоядерного реактора (ITER) по контрактам между ФГУП НИИЭФА им.Д.В. Ефремова и концерном «РОСАТОМ», договорам между ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г.Орел и ФГУП НИИЭФА им.Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург.

Цель диссертационной работы

Создание цельных многослойных металлокерамических структур.

Объект исследований

Стенка проточного тракта жидкометаллического blankets термоядерного реактора.

Предмет исследований

Адгезионное взаимодействие в многослойных металлокерамических структурах.

Задачи диссертационной работы

- определить рациональную технологию формирования и получения многослойной структуры, применительно к проточной части тракта жидкометаллического blankets ТЯР;

- разработать методику определения адгезионных параметров одно- и многокомпонентных материалов, в том числе, с учетом несплошности адгезионного контакта;
- обосновать теоретически и подтвердить экспериментально необходимость использования промежуточного слоя для улучшения качества адгезионного контакта между конструкционным материалом и электроизоляционным барьером;
- определить параметры диффузионной сварки многослойного электроизоляционного барьера проточного тракта жидкометаллического blankets ТЯР;

Методы исследования

В диссертации использованы теоретические и экспериментальные методы исследования. Теоретические методы опираются на аксиомы и законы механики сплошных упругих сред, термодинамики, представления о градиентных моделях материалов второго порядка.

Экспериментальные методы носят в основном качественный характер. Они демонстрируют влияние условий эксплуатации на конструкцию стенки до и после использования предложенной технологии, качество адгезионного шва после применения диффузионной сварки с расчетными значениями ее параметров, состояние разлома после разрушения нагрузкой, соизмеримой с расчетной.

Научная новизна

Впервые сформулирован и решен комплекс задач, направленных на исследование адгезионного контакта в многослойных металлокерамических структурах, включая жидкометаллический blanket термоядерного реактора, в том числе:

- выбрана рациональная технология получения многослойной структуры проточной части тракта жидкометаллического blankets термоядерного

- реактора, обеспечивающая требуемый ресурс работы;
- разработана научно-обоснованная методика определения адгезионных параметров одно- и многокомпонентных материалов, основанная на решении одномерной сопряженной задачи о контакте линейно упругих материалов второго порядка, механические свойства которых в рамках используемой модели определяются через известные, классические свойства;
 - теоретически обоснована и экспериментально подтверждена необходимость применения промежуточного слоя для улучшения прочности адгезионного контакта между конструкционным материалом и электроизоляционным барьером;
 - разработана научно-обоснованная методика определения параметров диффузионной сварки многослойного электроизоляционного барьера;
 - определены параметры технологии формирования многослойной структуры вакуумно-дуговым осаждением по методу катодно-ионной бомбардировки.

Обоснованность и достоверность результатов подтверждаются удовлетворительным совпадением расчетных и экспериментальных данных для широкого набора материалов кандидатных для магнитогидродинамического проточного тракта жидкометаллического blankets ТЯР, и обеспечиваются использованием обоснованных и апробированных моделей и методов механики сплошных сред, теории упругости.

Научная и практическая значимость

Научная значимость полученных в работе результатов состоит в расширении возможностей теории упругости изотропных материалов на решение задач по расчету поверхностной энергии и энергии адгезии твердых тел.

Реализация результатов работы

Полученные в диссертационной работе результаты использованы при проектировании испытательного модуля жидкометаллического blankets ITER.

Вместе с этим они послужили базисом и используются при создании жаростойких биметаллических обмоточных проводов, предназначенных для обмоток магнитогидродинамических насосов и статоров электродвигателей нового поколения реакторных установок, в частности, установки с реактором на быстрых нейтронах БН-1200.

Практическая ценность

Результаты работы могут быть применены для разработки технологии и расчета параметров процесса, определяющих ее, при изготовлении слоистых композиционных материалов в авиационной и электронной промышленности, других отраслях, использующих целостностные металлокерамические и другие структуры.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались:

- на 4-ой Международной конференции «Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения», проходившей в Санкт-Петербурге 26-28 июня 2001 г.;
- на Международной конференции «11th International Conference on Fusion Reactor Materials» проходившей Киото (Япония) 7-12 декабря 2003 г.;
- на Международной конференции «International WorkShop on Tritium Managment and Corrosion Activities for Liquid Breeder Blankets», September 27-29, 2004;
- на Международной конференции «International Workshop on liquid breeder blankets», проводимой в Санкт-Петербурге в 2006 г.;
- на Международной конференции «XIX Петербургские чтения по проблемам прочности», проводимой в Санкт-Петербурге 13-15 апреля 2010 г.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

- рациональная технология формирования и получения многослойной структуры, используемой в проточной части тракта жидкометаллического blankets ТЯР;
- методика определения адгезионных параметров одно- и многокомпонентных материалов, в том числе, с учетом несплошности адгезионного контакта;
- результаты теоретического обоснования и экспериментального подтверждения необходимости использования промежуточного слоя для улучшения качества адгезионного контакта между конструкционным материалом и электроизоляционным барьером;
- параметры диффузионной сварки многослойного электроизоляционного барьера проточного тракта жидкометаллического blankets ТЯР.

Публикации

По теме диссертации опубликовано шесть работ, включая четыре статьи, из них три в рецензируемых научных изданиях, определенных перечнем ВАК России.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и приложения, изложена на 152 страницах основного текста, содержит 24 рисунка и 12 таблиц. Список цитируемой литературы состоит из 120 наименований.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, решение которых способствует ее достижению.

Кроме того, в этом параграфе аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения. Отмечено, что создание цельной структуры многослойной стенки проточного тракта жидкометаллического blankets ТЯР требует для своей реализации разработки специальной рациональной технологии. Эта технология направлена на создание значимого продукта (стенки blankets) с комплексом оптимизируемых параметров (параметры сплошности адгезионного контакта элементов многослойной стенки и его прочности, а также прочности самих элементов, технологических режимов) при заданных ограничениях. Подчеркнуто, что разработка рациональной технологии потребовала создания методик расчета параметров адгезионного соединения и собственной прочности элементов стенки.

Первая глава «Особенности жидкометаллических МГД-каналов blankets термоядерного реактора»

Во введении к первой главе, являющимся ее первым параграфом, описано назначение электроизоляционных металлокерамических барьеров, приведены требования, предъявляемые к таким барьерам. Перечислены методы получения и способы формирования предложенных в работе многослойных металлокерамических электроизоляционных барьеров, в наибольшей степени отвечающих необходимым требованиям.

Отмечено, что такие барьеры, получаемые методами вакуумного осаждения покрытий, диффузионной сварки или электроннолучевой модификации металлической поверхности представляют, в общем случае, композит из чередующихся слоёв металла и изолятора.

Во втором параграфе показано, что одной из основных задач создания литиевого blankets является обеспечение проточного тракта электроизоляционным барьером, обладающего высоким электросопротивлением индуктированным токам, позволяющим минимизировать МГД-дресселирование по-

тока теплоносителя в течение всего ресурса работы.

В третьем параграфе отмечено, что выбор двух конструкционных материалов фактически предопределен. Ими являются сплав ванадий-хром-титан и нитрид алюминия исходя из терморadiационных, прочностных и коррозионных (по отношению к жидкому литию) и электроизоляционных требований.

Рассмотрены условия, которые необходимо соблюдать при выборе и отработке способа формирования многослойной структуры.

В четвертом параграфе подведены итоги первой главы.

Результаты второй главы опубликованы в работе [1].

Вторая глава «Технология создания целостной металлокерамической структуры стенки проточного тракта»

В первом параграфе рассмотрены методы формирования многослойных структур, области их применения, основные достоинства и недостатки, проанализирована возможность их использования для формирования многослойных металлокерамических электроизоляционных барьеров, пригодных для использования в проточной части blankets ТЯР и других перспективных направлений.

Во втором параграфе описана обоснованная на основании опыта и предварительных экспериментов структура электроизоляционного барьера, обеспечивающая: минимальные МГД и тепловые потери, требуемый ресурс работы, отсутствие в процессе эксплуатации blankets синтеза долгоживущих радионуклидов из применяемых материалов, возможность изготовления проточной части blankets на базе существующих технологий.

В этом же параграфе представлен перечень технологических операций предлагаемой рациональной технологии изготовления многослойной стенки blankets, основанный на результатах анализа четвертого параграфа. Представлены также качественные результаты исследований образцов (V – Cr – Ti)-

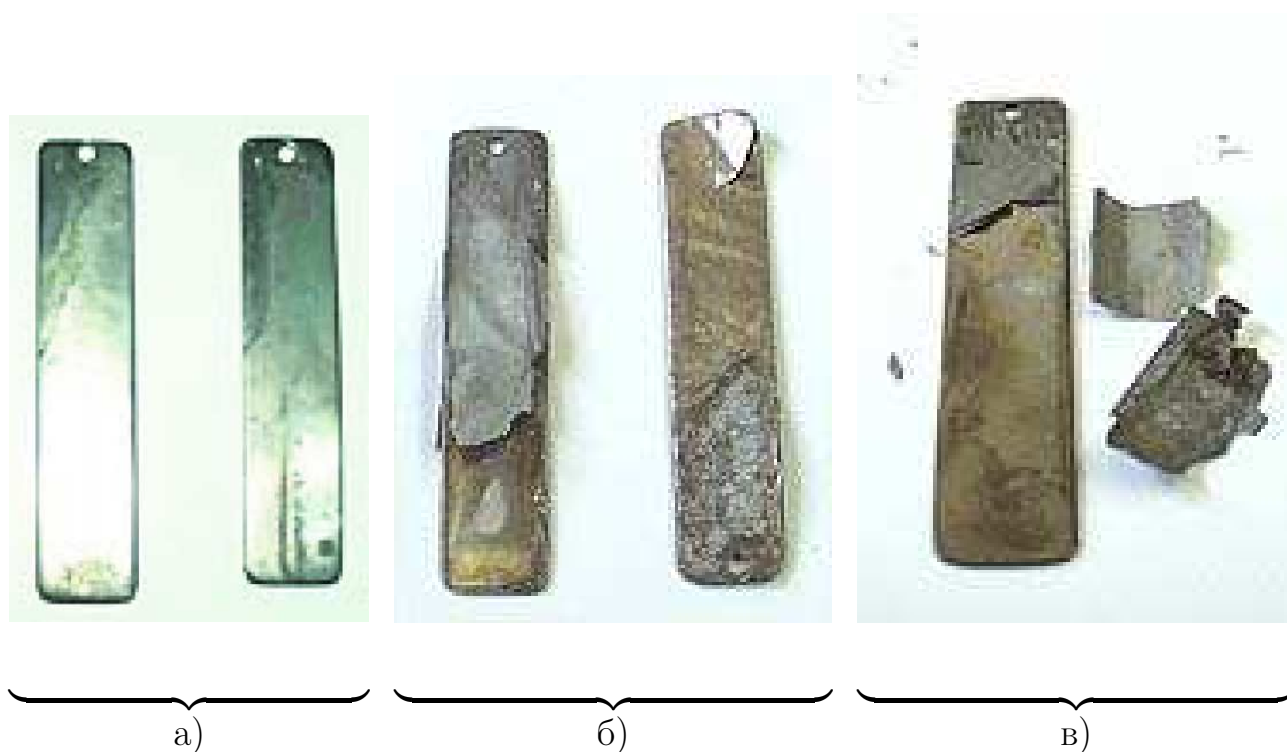


Рис. 1. Фотографии образцов $(V - 4Cr - 4Ti) - AlN - Cr$ после испытаний в жидком литии при $600^{\circ}C$ в течение 1000 часов.

На рисунке обозначено: а) образцы с улучшающим адгезию слоем хрома между $V - 4Cr - 4Ti$ и AlN ; б), в) образцы без промежуточного слоя хрома между $V - 4Cr - 4Ti$ и AlN .

$AlN-Cr$ после испытаний в жидком литии при $600^{\circ}C$ в течение 1000 часов (рис.1).

Очевидно, что после испытаний в литии покрытия $AlN + Cr$ отслаиваются от подложки из материала $V - 4Cr - 4Ti$, что подтверждает необходимость использования промежуточного слоя между $V - 4Cr - 4Ti$ и AlN . В третьем параграфе подведены итоги второй главы.

Результаты второй главы опубликованы в работе [2].

Третья глава «Методики определения адгезионных параметров»

В первом параграфе представлено существующее в физике определение понятия «адгезия разнородных твердых тел» как сцепление их поверхностей, обусловленное межмолекулярным взаимодействием (вандерваальсо-

вым, полярным, иногда — образованием химических связей). Отмечено, что одним из параметров прочности адгезии является энергия адгезии F_a приходящееся на единицу площади поверхности адгезии изменение свободной энергии тел, произошедшее в изотермическом обратимом процессе их адгезии, вычисляемое по формуле

$$F_a = W_p^{(1,2)} - (W_p^{(1)} + W_p^{(2)}). \quad (1)$$

Здесь $W_p^{(1)}$, $W_p^{(2)}$ — поверхностные энергии тел до их адгезии, а $W_p^{(1,2)}$ — их суммарная поверхностная энергия после наступления состояния адгезии. Кроме того, в параграфе, после соответствующего анализа, отмечена трудность или невозможность использования физических методов расчета энергии адгезии реальных материалов с их сложным химическим составом и случайным характером атомной структуры, вместо которых предложено задачу об адгезии упругих материалов рассматривать как сопряженную о напряженно-деформированном состоянии кусочно - неоднородной упругой среды в отсутствии внешних воздействий. При этом соответствующие изменения свободной энергии в изотермическом процессе приравниваются энергии упругих деформаций, возникающих при адгезии. Предложено также считать признаком адгезионного контакта сохранение непрерывности не только поля перемещений, как в классической теории упругости, но и их градиентов.

Во втором параграфе показана возможность количественной оценки поверхностной энергии и энергии адгезии.

Во третьем параграфе представлена модель упругой среды, использованная для расчета прочности адгезии – модель упругой среды второго порядка, когда объемная плотность w потенциальной энергии, приобретаемой при появлении малых упругих деформаций, является функцией не только первого, но и второго градиента перемещений и определяется в одномерном

случае, используемом в работе, выражением:

$$w = \pi_0 \left(\frac{d^2 u_1}{dx_1^2} \right) + \frac{1}{2} (2\mu + \lambda) \left(\frac{du_1}{dx_1} \right)^2 + \frac{1}{2} (2\mu + \lambda) b^2 \left(\frac{du_1^2}{dx_1^2} \right)^2. \quad (2)$$

Здесь x_1 и u_1 – координата, отсчитываемая вдоль нормали к поверхности адгезионного контакта, которая принята в работе плоской, и перемещение вдоль этого направления частиц среды (перемещения в других направлениях по предположению отсутствуют); λ , μ – коэффициенты Ламэ; π_0 , b – дополнительные константы, характеризующие неклассические свойства материала. Для успешного использования выбранной модели среды найдены способы определения величин π_0 , b . Первый основан на выявленной связи модуля Юнга, поверхностной энергии и параметров π_0 , b . Второй способ основан на учете нелокального потенциального взаимодействия бесконечно малых частиц упругой среды. Для расчета энергии адгезии использована вытекающая из принятой модели среды формула:

$$F = |F_a| = \frac{W_p^{(1)} W_p^{(2)} (k^{(1)} + k^{(2)})^2}{W_p^{(1)} k^{(2)2} + W_p^{(2)} k^{(1)2}}, \quad (3)$$

где $k^{(j)} = \frac{\nu^{(j)}}{1 - \nu^{(j)}}$, $j = 1, 2$ – номер взаимодействующего материала. Она обобщает формулу, получающуюся из данной при пренебрежении различиями коэффициентов Пуассона $\nu^{(1)}$ и $\nu^{(2)}$.

В четвертом параграфе главы предложена методика оценки энергии адгезии для материалов, имеющих гетерогенную структуру, в частности, многокомпонентных материалов, проведена оценка энергии адгезии для сочетаний материалов, перспективных для применения в жидкометаллических бланкетах ТЯР, а также приводятся результаты испытаний многослойных композитов в жидком литии при температуре 600°C . Для сочетаний материалов, представляющих практический интерес проведены соответствующие расчеты и построены зависимости энергии адгезии от коэффициента Пуассона ν и модуля Юнга E (рис. 2).

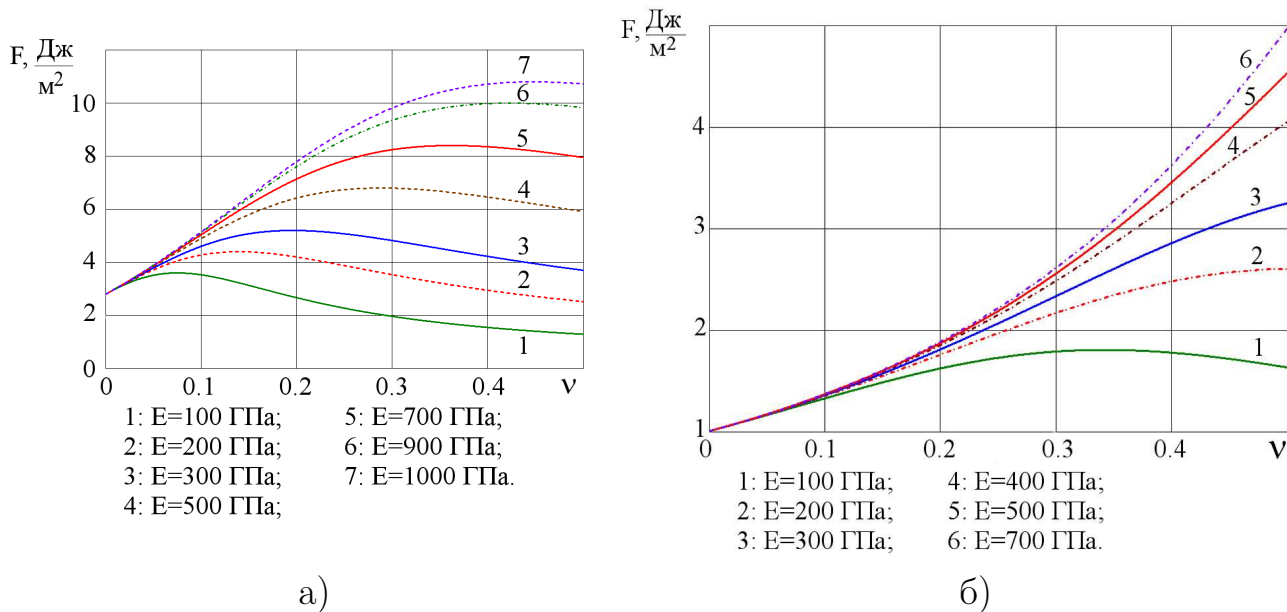


Рис. 2. Зависимость энергии адгезии F сочетаний материалов с различными значениями E с: а) AlN и б) V – Cr – Ti от коэффициента Пуассона ν материала промежуточного слоя.

Отмечено, что результаты проведенных испытаний многослойных электроизоляционных барьеров в жидком литии при температуре 600°C в течении 1000 часов (рис.1 а, б, в) качественно подтверждают сделанные предположения. Проведенный анализ показывает, что наиболее приемлемыми материалами для промежуточного слоя, позволяющего снизить вероятность отслоения AlN от сплавов V – Cr – Ti, с точки зрения адгезионных свойств и технологии получения, являются хром и молибден.

В пятом параграфе представлены методики определения и результаты расчета адгезионных параметров однокомпонентных и многокомпонентных материалов, рассмотрено влияние несплошности адгезионного контакта на адгезионные параметры материалов, а также произведен расчет адгезионных параметров материалов, используемых в жидкометаллическом бланкете термоядерного реактора (рис.3). Для этого использовано выражение, определяющее относительную площадь адгезионного контакта α от поверхностной

энергии W :

$$\alpha = \left(1 + \frac{2W_{\alpha\alpha} - W_{\alpha(1-\alpha)}}{2W_{(1-\alpha)(1-\alpha)} - W_{\alpha(1-\alpha)}} \right)^{-1}, \quad (4)$$

а также сделанное в параграфе определение энергии адгезии F взаимодействующих между собой тел $B^{(1)}$ и $B^{(2)}$, учитывающее несплошность адгезионного контакта. В параграфе представлены результаты расчета относительной площади адгезионного контакта от отношений модулей Юнга и коэффициентов Пуассона контактирующих материалов. Эти расчеты послужили основанием для выбора материала промежуточного слоя. Показано, что наиболее предпочтительным материалом промежуточного слоя между $V - Cr - Ti$ и AlN является молибден.

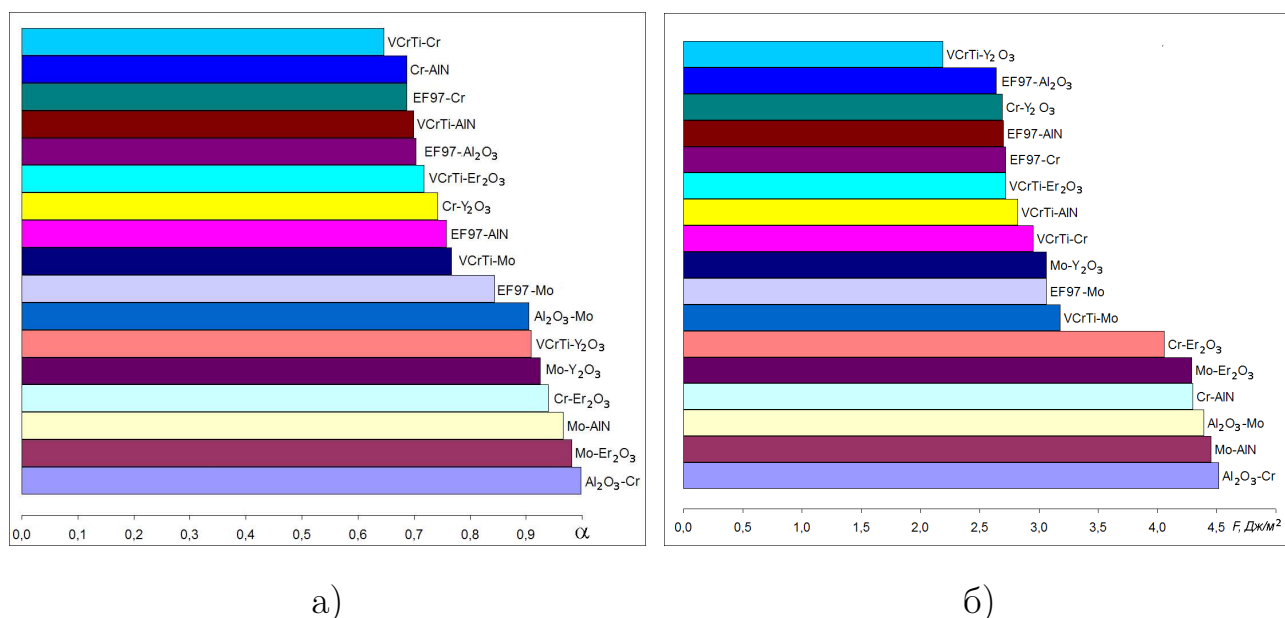


Рис. 3. а) Относительная площадь контакта и б) энергия адгезии сочетаний различных материалов.

Однако, учитывая, что при воздействии ионизирующего излучения молибден порождает долгоживущие радионуклиды, в качестве промежуточного слоя рекомендован хром.

Расчет адгезионных параметров многокомпонентных материалов (сплавов и соединений), предложено проводить на основании соотношений, полученных для однокомпонентных материалов. При этом коэффициенты Ламэ и

средние межатомные расстояния многокомпонентных материалов могут быть вычислены с использованием весовых коэффициентов.

Для определения приемлемого, с точки зрения адгезионных параметров, соотношения компонент в сплаве $V - nCr - mTi$ - кандидатного конструкционного материала проточной части литиевого blankets термоядерного реактора, проведены расчеты зависимостей энергии адгезии и относительной площади контакта от содержания хрома и титана в сплаве $V - nCr - mTi$ (рис.4), представлены основанные на этом расчете практические рекомендации.

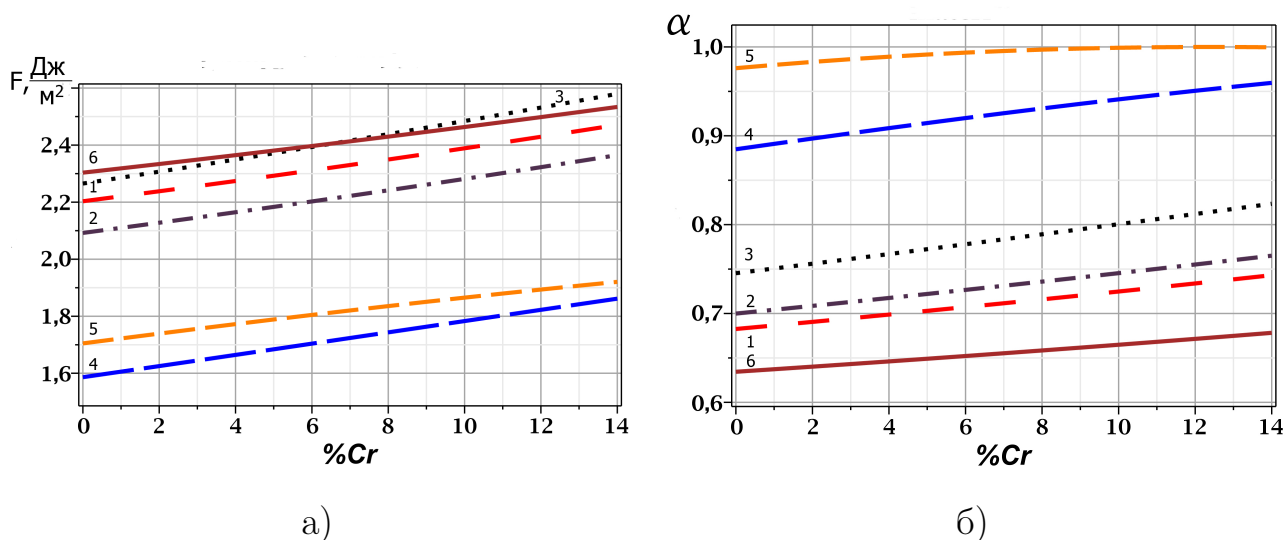


Рис. 4. Зависимость а) энергии адгезии и б) площади относительного контакта между различными материалами и сплавами со сплавом $V - nCr - 4Ti$ от содержания в нем хрома: 1-AlN; 2-Er₂O₃; 3-Mo; 4-Y₂O₃; 5-Ni; 6-Cr.

В шестом параграфе рассмотрено влияние на значение поверхностной энергии микротрещин, сеть которых возникает на свободной поверхности ряда материалов из-за высоких значений растягивающих напряжений. Показано, что из-за увеличения, за счет поверхности берегов трещин реальной свободной поверхности, значение поверхностной энергии, отнесенное к

гладкой свободной поверхности больше и вычисляется по формуле

$$W_p = \gamma W_p^0 = \frac{3\gamma\pi_0^2}{2b(2\mu + \lambda)}. \quad (5)$$

В этой формуле коэффициент γ , учитывающий наличие трещин, рассчитывается по разработанной автором методике.

Кроме того, существует вероятность, что глубина микротрещин может совпасть с толщиной покрытия. В этом случае окрестность угловой линии покрытия, принадлежащей к поверхности основы, является концентратором напряжений, способствующих отслаиванию покрытия от основы. Вопросы связанные с выяснением причин отслаивания в подобных ситуациях подробно рассмотрены в работе [3].

В седьмом параграфе подведены итоги третьей главы.

Результаты третьей главы опубликованы в [2–5].

Четвертая глава «Расчет параметров диффузионной сварки при формировании многослойной стенки канала жидкометаллического blankets»

В первом параграфе дано описание процесса диффузионной сварки. Указано, что для обеспечения монолитности и заданного ресурса конструкции при сохранении функциональных свойств электроизоляционного барьера необходимо обеспечить правильность выбора толщины слоев и параметров диффузионной сварки – температуры T_c , давления p_c , времени τ_c .

Во втором параграфе приведены основные положения, принятые в основу методики расчета параметров диффузионной сварки, базирующихся на изложенных в предыдущей главе теоретических результатах.

В третьем параграфе представлены результаты расчета параметров диффузионной сварки как одного из технологических процессов, входящих в предлагаемую рациональную технологию изготовления целостной структуры стенки жидкометаллического blankets ТЯР.

Здесь же описаны эксперименты по определению усилия разрыва конструкции, изготовленной в соответствии с предложенной технологией и рассчитанными режимами ее реализации, и определению сплошности адгезионного контакта, полученного в результате адгезионной сварки. Эксперименты подтвердили качественно и количественно справедливость изложенных в работе теоретических положений и результатов.

Результаты четвертой главы опубликованы в [6].

Заключение

В результате проведенного исследования решен комплекс задач, направленных на решение технологической проблемы предупреждения недопустимых деформаций и трещин в многослойных композиционных материалах на примере металлокерамической стенки жидкометаллического blankets термоядерного реактора, а именно:

- определена рациональная технология формирования и методика получения многослойной структуры, применительно к проточному тракту жидкометаллического blankets термоядерного реактора, позволяющая создавать цельные многослойные металлокерамические каналы;
- разработана методика определения адгезионных параметров одно- и многокомпонентных материалов, учитывающая несплошность адгезионного контакта;
- впервые определены параметры диффузионной сварки многослойного электроизоляционного барьера применительно к стенке жидкометаллического проточного тракта blankets термоядерного реактора;

Основные публикации по теме диссертации:

1. Vitkovsky, I. V. Some ways of MHD pressure drop reduction in self-cooled liquid metal blankets / I. V. Vitkovsky, I. R. Kirillov, **A. N. Konev** et al. // International Workshop on liquid breeder blankets. — St. Petersburg: Efremov Institute, 2006. — P. 32.
2. Vitkovsky, I. V. Adhesion energy estimation of some composite materials / I. V. Vitkovsky, **A. N. Konev**, V. S. Shorkin et al. // Plasma Devices and Operations. — 2003. — Vol. 11, № 2. — P. 81–87.
3. Витковский, И. В. Напряженное состояние электроизоляционного барьера в структуре стенки жидкометаллического blankets термоядерного реактора / И. В. Витковский, Н. А. Долгов, **А. Н. Конев** // **Журнал Технической Физики**. — 2011. — Т. 81, № 10. — С. 129–132.
4. Витковский, И. В. Теоретическая оценка несплошности адгезионного контакта многослойных элементов жидкометаллического blankets термоядерного реактора / И. В. Витковский, **А. Н. Конев**, В. С. Шоркин, С. И. Якушина // **Журнал Технической Физики**. — 2007. — Т. 77, № 6. — С. 28–33.
5. Витковский, И. В. Теоретическое определение адгезионных свойств материалов для жидкометаллического blankets термоядерного реактора / И. В. Витковский, **А. Н. Конев**, В. С. Шоркин // **Журнал Технической Физики**. — 2009. — Т. 79, № 2. — С. 11–16.
6. Фроленкова, Л. Ю. Моделирование процессов диффузионной сварки / Л. Ю. Фроленкова, В. С. Шоркин, И. В. Витковский, **А. Н. Конев** // XIX Петербургские чтения по проблемам прочности. Санкт-Петербург, 13-15 апреля 2010 г.: сборник материалов. — Ч.1. — СПб: 2010. — С. 91–93.

Подписано в печать 23 апреля 2012 г.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № 1715

Отпечатано с готового оригинал - макета на полиграфической базе

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК». Россия, 302030, г. Орел, ул. Московская, д. 65.