

На правах рукописи



Конев Алексей Николаевич

**Энергетическая оценка прочности соединения  
слоистых композиционных материалов в  
рамках градиентной теории упругости**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

г. Орёл – 2013

Работа выполнена в *ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК»*, г.Орел.

Научный руководитель

***Витковский Иван Викторович***

*доктор технических наук,*

*старший научный сотрудник*

Официальные оппоненты:

***Баранов Виктор Леопольдович***

*доктор технических наук, профессор*

*кафедры «Стрелково-пушечное*

*вооружение», ТулГУ, г.Тула,*

***Головешкин Василий Адамович***

*доктор технических наук, профессор*

*кафедры «Высшая математика»*

*(ИТ-1), МГУПИ, Москва*

Ведущая организация

*ОАО «НПО «Сплав», г.Тула*

Защита состоится 23 декабря 2013 года в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д212.182.03 созданного на базе *ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК»*, г.Орел, расположенном по адресу: 302030 г.Орел, ул. 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 Государственного университета – УНПК по адресу: <http://gu-unpk.ru>.

Автореферат разослан 19 ноября 2013.

Ученый секретарь

диссертационного совета



*Борзенков Михаил Иванович*

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Тенденции развития многих современных отраслей техники (атомного машиностроения, авиастроения, энергетического и химического машиностроения, судостроения, приборостроения, строительство пневматических конструкций, воздухоопорных зданий и сооружений, легкой и текстильной промышленности и т.д.), создание устройств, реализующих на практике новые способы получения энергии, в частности управляемый термоядерный синтез, характеризуются интенсивным внедрением конструкций из композитных материалов.

Многослойные композиты наиболее привлекательны благодаря высоким значениям удельной прочности и жесткости. Они могут эксплуатироваться в широком диапазоне температур, имеют малый коэффициент температурного расширения, что и делает их материалами с широкими технологическими возможностями.

Функционирование композиционного материала возможно лишь при условии сохранения его целостности. Проблемы прочности композиционных материалов, обеспечения их целостности, выяснения причин их расслоения на протяжении многих лет находятся в поле зрения механики деформируемого твердого тела. Достаточно упомянуть лишь работы Леонова М.Я., Панасюка В.В., Баренблатта Г.И., Болотина В.В., Черепанова Г.П., Немировского Ю.В., Победри Б.Е., Григолюка Э.И., Терегулова И.Г., Работнова Ю.Н., Головешкина В.А., Баранова В.Л.

В настоящее время актуальность исследования проблем прочности композиционных материалов, несмотря на большое количество уже сделанных в этом направлении исследований, только возрастает.

Это обусловлено не только повышением уровня требований к прочност-

ным расчетам композиционных материалов в уже известных конструкциях, аппаратах и изделиях, но и перспективностью создания на их основе новых, недоступных ранее видов изделий (например, термоядерный реактор – международные проекты ITER, DEMO), в которых элементы, составляющие композит, выбираются из соображений получить заданное сочетание разнородных свойств, связанных с функционированием изделия в целом.

Актуальность темы диссертации подчеркивается тем, что 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.

Таким образом, энергетическая оценка прочности соединения слоистых композиционных материалов в рамках градиентной теории упругости является весьма актуальной темой для исследования.

### **Цель работы**

Обеспечение целостности слоистого композиционного материала.

### **Объект исследования**

Слоистый композиционный материал.

### **Предмет исследования**

Характеристики прочности соединения элементов слоистого композиционного материала.

### **Задачи исследования**

1. Обосновать на основе одномерной математической модели адгезионного контакта применения теории упругости для расчета энергии адгезии конструкционных материалов.
2. Разработать математическую модель образования микротрещин поверхностного слоя градиентного упругого материала.

3. Разработать на основании градиентной теории упругости математическую модель адгезионного контакта элементов слоистого композиционного материала.
4. Разработать научно-обоснованные рекомендации и методики по выбору состава слоистого композиционного материала, обеспечивающего его высокую прочность при различных температурных режимах.

### **Методология и методы исследования**

Все исследования осуществлялись на основе принципов системного подхода. В теоретических исследованиях использовались методы математического моделирования механики сплошных упругих сред, композиционных материалов, термодинамики, теории разрушения, представления о градиентных моделях разных порядков. При проведении экспериментальных исследований – методы экспериментальной механики.

### **Научная новизна**

1. Разработана математическая модель адгезионного контакта элементов слоистого композиционного материала на основе градиентной теории упругости, позволяющая рассчитывать характеристики адгезионного контакта.
2. Выявлена связь дополнительных характеристик упругого материала второго порядка с классическими характеристиками, позволяющая определять их значения.
3. Разработана математическая модель образования микротрещин поверхностного слоя, определяющая наиболее точно величину поверхностной энергии.
4. Разработаны научно-обоснованные рекомендации и методики по выбору состава слоистого композиционного материала, при этом получены зависимости относительной площади адгезионного контакта, энергии адгезии, а также их экстремальных значений от безразмерных харак-



теристик упругого состояния материалов слоистого композита, их концентрационного состава и температуры.

**Достоверность полученных результатов обеспечивается** корректностью постановки задач исследования, обоснованностью использования теоретических построений, допущений, применением апробированных математических методов, современной вычислительной техники и программного обеспечения, а также подтверждается качественным и количественным совпадением полученных результатов с известными результатами других авторов.

**Теоретическая значимость** полученных результатов состоит в том, что разработанная на основе градиентной теории упругости математическая модель адгезионного контакта элементов слоистого композиционного материала и выявленная при этом связь дополнительных характеристик упругого материала второго порядка с классическими характеристиками, определяющая их значения, а также разработанная математическая модель образования микротрещин поверхностного слоя, позволяющая наиболее точно определить величину поверхностной энергии существенно дополняют теорию упругости и расширяют ее возможности.

**Практическая ценность** полученных результатов состоит в том, что разработанные научно-обоснованные рекомендации и методики по выбору состава слоистого композиционного материала и полученные при этом зависимости относительной площади адгезионного контакта, энергии адгезии, а также их экстремальных значений от безразмерных характеристик упругого состояния материалов слоистого композита, их концентрационного состава и температуры использованы при проектировании испытательного модуля жидкометаллического blankets ITER и вместе с этим они явились базисом и применяются 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.

### **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.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Для энергетической оценки прочности соединения слоистых композиционных материалов возможно применения градиентной теории упругости путем определения энергии адгезии их элементов с использованием одномерной математической модели адгезионного контакта их элементов.
2. Рациональный выбор состава слоистого композиционного материала, обеспечивающий его целостность при эксплуатации, можно осуществить с помощью зависимостей энергии адгезии от механических свойств соединяемых элементов и температуры их эксплуатации, выявленных на основе моделирования образования микротрещин поверхностных слоев и адгезионного контакта упругих материалов.

## **Публикации**

По теме диссертации опубликовано семь работ, включая пять статей, из них четыре в рецензируемых научных изданиях, определенных перечнем ВАК России.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения, изложена на 118 страницах основного текста, содержит 26 рисунков и 12 таблиц. Список цитируемой литературы состоит из 85 наименований.



## Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель, изложена научная новизна и результаты, выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимость работы и достоверность полученных результатов.

В первой главе рассмотрена возможность моделирования адгезионного контакта в рамках градиентной теории упругости. Сделана постановка задачи об энергетической оценке прочности слоистых композитов в рамках градиентной теории упругости с помощью представления о величине энергии адгезии их элементов. В рамках этой постановки рассмотрена техническая проблема, определяющая необходимость моделирования явления адгезии методами механики деформируемого твердого тела, а также задачи, которые необходимо решить с помощью этого моделирования. Изложены также представления об энергии адгезии и существующих методах ее вычисления.

Техническая проблема состоит в создании целостных многослойных структур, слоистых композитов. В частности, конкретная проблема, повлекшая проведение представленных в диссертации исследований по теоретической оценке прочности адгезионных соединений с помощью вычисления энергии адгезии, состоит в необходимости создания многослойной металлокерамической стенки проточного тракта термоядерного реактора.

Энергия адгезии равна изменению свободной энергии и, приходящемуся на единицу площади их адгезионного контакта, произошедшему с ними в изотермическом обратимом процессе адгезионного соединения. Вместе с этим, теория упругости использует понятие изменения свободной энергии при оценке энергии упругих деформаций. Следовательно, возможность оценки энергии адгезии посредством теории упругости имеется. Для этого предлагается учесть то обстоятельство, что в соответствии с представлениями Гиббса слой

материала, в котором сосредотачивается поверхностная энергия при образовании свободной поверхности, имеет хоть и очень малую, но конечную толщину. В этом случае суммарная поверхностная энергия приравнивается суммарному изменению свободной энергии, равному (по предположению) энергии упругих деформаций

$$\int_A W_p dA = \int_V w dV. \quad (1)$$

Отмечено также, что модели упругой среды, позволяющие сделать это, имеются. Для таких моделей характерно наличие малого параметра при старшей производной от компонент вектора перемещений по координатам. Это обстоятельство гарантирует моделирование переходного слоя.

**Вторая глава**, «Модель упругой среды», посвящена краткому изложению положений выбранной модели упругой среды, позволяющей вычислять энергию адгезии линейно упругих изотропных материалов. В рамках выбранной модели деформированное состояние материала описывается не только первым, как это делается в классической теории упругости, но и вторым градиентами ( $\nabla \vec{u}$  и  $\nabla^2 \vec{u}$ ) вектора  $\vec{u}$  перемещений частиц материала из отсчетного состояния в текущее. Деформации предполагаются малыми. Так что в качестве тензоров деформации избраны классический тензор малых деформаций  $g^{(1)} = \frac{1}{2} (\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T)$  и новый тензор  $g^{(2)} = \nabla^2 \vec{u}$ , совпадающий со вторым градиентом перемещений. Уравнения связи их компонент не строились и не рассматривались, так как в работе рассматривались лишь одномерные процессы, а определяющие уравнения и уравнения равновесия записывались в перемещениях.

Деформируемое твердое тело и любая его часть является термодинамической системой. Ее состояние характеризуется термодинамическим потенциалом – свободной энергией, объемная плотность которой  $F$  является функцией параметров термодинамического состояния  $\Phi^{(1)} = \nabla \vec{u}$ ,  $\Phi^{(2)} = \nabla^2 \vec{u}$  и

температуры  $T : F(\nabla\vec{u}, \nabla^2\vec{u}, T)$ . Ее бесконечно малое приращение  $dF$ , возникающее при бесконечно малых приращениях аргументов  $d(\nabla\vec{u})$ ,  $d(\nabla^2\vec{u})$ ,  $dT$ , является полным дифференциалом:

$$dF = \frac{\partial F}{\partial(\nabla\vec{u})} \cdot d(\nabla\vec{u}) + \frac{\partial^2 F}{\partial(\nabla^2\vec{u})} \cdot d(\nabla^2\vec{u}) + \frac{\partial F}{\partial T} dT. \quad (2)$$

В работе допускается, что изменениями температуры, происходящими в материале при образовании свободной поверхности или при адгезии двух твердых тел, можно пренебречь ( $dT = 0$ ). Тогда изменение свободной энергии равно изменению энергии упругих деформаций:  $F = w$ . При этом предполагается, что функция  $w(\nabla\vec{u}, \nabla^2\vec{u})$  является полиномом второй степени от своих аргументов, а первые две частные производные в выражении 2 – тензорами напряжений  $P^{(1)}$  и  $P^{(2)}$  соответственно. В результате оказываются справедливыми равенства:

$$w = 2\mu g_{ii}^{(1)} g_{jj}^{(1)} + \lambda g_{ii}^{(1)} g_{jj}^{(1)} + (2\mu + \lambda) b^2 \Phi_{ijk}^{(2)} \Phi_{ijk}^{(2)} + \pi_0 \delta_{ij} E_k \Phi_{ijk}^{(2)}. \quad (3)$$

Тензоры  $g^{(1)}$  и  $g^{(2)}$  являются теми обобщенными перемещениями, на которых совершают работу внутренние обобщенные силы – тензоры напряжений  $P^{(1)}$  и  $P^{(2)}$  соответственно. Выражения, связывающие тензоры напряжений и тензоры деформаций имеют вид:

$$\begin{aligned} P_{ij}^{(1)} &= 2\mu g_{ij}^{(1)} + \lambda \delta_{ij} g_{kk}^{(1)}; & g_{ij}^{(1)} &= \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}); \\ P_{ijk}^{(2)} &= (2\mu + \lambda) b^2 \Phi_{ijk}^{(2)} + \pi_0 \delta_{ij} E_k; & \Phi_{ijk}^{(2)} &= u_{i,j,k}. \end{aligned} \quad (4)$$

Тензор  $P^{(1)}$  имеет классический вид. Первое слагаемое тензора  $P^{(2)}$  связано с зависимостью напряженного состояния от второго градиента перемещений. Второе слагаемое этого тензора обусловлено внутренним напряженным состоянием, существующем в материале в отсутствии внешних воздействий. В принятой модели упругой среды предполагается, что вдоль границ любой части тела существует потенциальное поле, посредством которого эта часть действует на контактирующие с ней другие части того же тела.

В выражениях (3), (4)  $\mu$ ,  $\lambda$  – параметры Ламэ;  $\pi_0$ ,  $b$  – дополнительные константы. Значения дополнительных констант  $\pi_0$ ,  $b$  определялись разными способами: с помощью значение поверхностной энергии, примерно равное  $8E \cdot 10^{-12}$  (обосновано в работе) и предположение о равенстве поверхностной энергии и поверхностного натяжения; на основании предположения о потенциальном взаимодействии частиц материала.

Уравнения движения изучаемой среды получены с помощью вариационного принципа Гамильтона – Остроградского. Они имеют следующий вид.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (P^{(1)} - \nabla \cdot P^{(2)}) + \rho \vec{f} &= \rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} : \quad \vec{r} \in V; \\ \vec{n} \cdot (P^{(1)} - \nabla \cdot P^{(2)}) - \nabla_A \cdot (\vec{n} \cdot P^{(2)}) &= \vec{\sigma} : \quad \vec{r} \in A_\sigma; \\ \vec{n} \cdot P^{(2)} &= \vec{m} : \quad \vec{r} \in A_m. \end{aligned} \quad (5)$$

В точках участков  $A_u$ ,  $A_{\nabla u}$  границы  $A$ , дополняющих соответственно  $A_\sigma$  и  $A_m$  до полной поверхности  $A$ , не подверженных действию поверхностно распределенных сил и гиперсил, линейно распределенных сил, задаются кинематические условия:

$$\begin{aligned} \vec{u} &= \vec{u}_A : \quad \vec{r} \in A_u; \\ \nabla_n \vec{u} &= \nabla_n \vec{u}|_A : \quad \vec{r} \in A_{\nabla u}. \end{aligned} \quad (6)$$

Система уравнений (5), (6) является системой дифференциальных уравнений движения и краевых условий для изучаемой среды. В начальный момент времени задаются поля перемещений и их скоростей.

$$\begin{aligned} \vec{u}(0, \vec{r}) &= \vec{u}_0(\vec{r}); \\ \left. \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \right|_{t=0} &= \vec{v}(0, \vec{r}) = \vec{v}_0(\vec{r}). \end{aligned} \quad (7)$$

Функции  $\vec{u}_0(\vec{r})$ ,  $\vec{v}_0(\vec{r})$  – начальные распределения перемещений и их скоростей, считаются известными.

Условие сохранения момента импульса в данной работе выполняется тождественно.

В третьей главе представлено решение задачи о напряженно-деформированном состоянии упругого тела, свободного от внешних воздействий. Задача рассмотрена с целью вычисления объемной плотности энергии упругих деформаций, возникающих при образовании свободной поверхности и последующего построения на основании равенства (1) выражения для вычисления поверхностной энергии. Предполагалось, что размеры рассматриваемых тел, кривизна их поверхности намного превышает толщину слоя, в котором концентрируется поверхностная энергия. Это послужило основанием для рассмотрения полубесконечного тела, занимающего область  $V$ , ограниченную поверхностью  $A$ , определенными равенствами:

$$V: \quad -\infty < x_2, x_3 < +\infty; \quad 0 < x \equiv x_1 < +\infty \quad (8)$$

$$A: \quad -\infty < x_2, x_3 < +\infty; \quad 0 = x \equiv x_1 \quad (9)$$

Процесс деформирования предполагается одномерным в направлении нормали к  $A$ . В результате для перемещений получено точное решение:

$$u(x) = \frac{\pi_0}{(2\mu + \lambda)} \left( e^{-\frac{x}{b}} - 1 \right) \quad (10)$$

Используя это выражение получены формулы для поверхностного натяжения:

$$P = \int_0^{\infty} P_{22}^{(1)}(x) dx = \frac{\lambda}{(2\mu + \lambda)} \pi_0, \quad (11)$$

и поверхностной энергии

$$W_p = \int_0^{\infty} w(x) dx = \frac{3}{4} \frac{\pi_0^2}{(2\mu + \lambda) b}. \quad (12)$$

Для расчета параметров  $b$ ,  $\pi_0$  использованы два варианта. Первый из них – косвенный, опирается на полуэмпирические рассуждения об оценке прочности материала на разрыв.



Допускается, что поверхностное натяжение совпадает с поверхностной энергией  $P = W_p$ . На основании теории трещин Гриффитса предложено это влияние учитывать, например, для предела прочности, следующим образом:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{EW_p}{4c}}, \quad (13)$$

где  $2c$  - усредненная длина трещин в материале. В тоже время экспериментально было установлено, что усредненная длина трещин  $2c \approx 10^{-6}$  м, а

$$\sigma_f = \frac{E}{500} \quad (14)$$

Принимая во внимание (13) и (14) получено выражение для оценки величины поверхностной энергии:

$$W_p = 16 E c \cdot 10^{-6}. \quad (15)$$

При  $2c = 10^{-12}$  м получаем выражение:

$$W_p = 8 E \cdot 10^{-12} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}. \quad (16)$$

Используя его можно вычислить константы  $b$ ,  $\pi_0$ :

$$b = \frac{3(2\mu + \lambda)}{4\lambda^2} W_p; \quad \pi_0 = \frac{(2\mu + \lambda)}{\lambda} W_p. \quad (17)$$

Второй вариант расчета характеристик упругого состояния (прямой) опирается на представление о нелокальном потенциальном взаимодействии частиц упругой среды. В результате параметры  $\pi_0$  и  $b$  определяются равенствами:

$$\pi_0 = P_{111}^{0(2)} = -\frac{\pi}{2} \int_0^{\infty} \frac{d\Phi}{dl} l^4 dl; \quad b = \frac{l^*}{2\sqrt{3}}. \quad (18)$$

В этом выражении  $a$  - расстояние между взаимодействующими частицами  $dV$  и  $dV_1$ ;  $\Phi(a) dV dV_1 = D (e^{-2\beta a} - 2e^{-\beta a}) dV dV_1$  - потенциал взаимодействия этих частиц, имеющих объемы  $dV$  и  $dV_1$ . Параметры потенциала  $D$  и



$\beta$  вычисляются через известное значение модуля Юнга изучаемого материала и среднее межатомное расстояние. При расчете поверхностной энергии этим методом учитывалось, что в поверхностном слое развиваются растягивающие напряжения, превышающие по величине предел прочности. Из-за этого поверхность испещрена сетью микротрещин (в диссертации ее ячейки – квадраты со стороной  $2b$ ), ослабляющих растягивающие напряжения. Представлен метод расчета глубины микротрещин  $h$ , угла их раскрытия  $\alpha$ , опирающийся на идеи расчета параметров трещин Гриффитса. Предполагается, что поверхностная энергия распределена не только вдоль гладких участков поверхности, но и берегов микротрещин. В результате энергия, приходящаяся на единицу площади поверхности без трещин, вычисляется по формулам:

$$W_p = \frac{3\gamma\pi_0^2}{2b(2\mu + \lambda)}; \quad \gamma = 2 \left( \frac{h}{b \cos \alpha} \right) + 1. \quad (19)$$

Результаты расчетов поверхностной энергии химически однородных материалов сопоставляются с данными справочной литературы. Соответствие удовлетворительное. Это послужило основанием для использования предложенных методов расчета поверхностной энергии у материалов со сложным химическим составом, а также тех сплавов, которые можно считать твердыми растворами. Методика расчета их упругих характеристик, с помощью которых рассчитывается поверхностная энергия, представлена в третьей главе.

**Четвертая глава** посвящена рассмотрению задачи об адгезии двух твердых тел. Задачей об адгезии двух твердых деформируемых тел в данной работе считается задача о напряженно-деформируемом состоянии двух линейно упругих тел из материалов второго порядка с начальным напряженным состоянием, находящихся в состоянии жесткого контакта при отсутствии внешних механических воздействий на них. Жестким контактом двух твердых линейно упругих тел из материалов второго порядка в данной работе считается такой вид их контакта, который отвечает следующим условиям:

- он происходит вдоль гладкой поверхности;

- при переходе через нее сохраняется непрерывность нормальных составляющих полей тензоров напряжений первого и второго типа;
- при переходе через нее сохраняется непрерывность обобщенных перемещений, на которых эти нормальные составляющие совершают механическую работу.

Энергия адгезии вычисляется по формуле:

$$F_a = \frac{W_p^{(1)} W_p^{(2)} (k^{(1)} + k^{(2)})^2}{W_p^{(1)} k^{(2)2} + W_p^{(2)} k^{(1)2}}; \quad k^{(1)} = \frac{\nu^{(1)}}{1 - \nu^{(1)}}; \quad k^{(2)} = \frac{\nu^{(2)}}{1 - \nu^{(2)}}. \quad (20)$$

Формула получена для жесткого контакта вдоль фиксированной плоскости  $A^{(1,2)}$  двух полубесконечных тел  $B^{(1)}$  и  $B^{(2)}$  на основании известной из физики формулы  $F_a = W_p^{(1,2)} - W_p^{(1)} - W_p^{(2)}$ , допущений о жестком контакте, полученных в третьей главе формул для расчета поверхностной энергии, а также распределенной вдоль  $A^{(1,2)}$  поверхностной энергии  $W_p^{(1,2)}$ , равной приходящейся на единицу площади  $A^{(1,2)}$  изменению энергии упругих деформаций системы тел  $B^{(1)}$  и  $B^{(2)}$ , произошедшему при возникновении между ними жесткого контакта. Процессы деформирования в контактирующих телах предполагались одномерными, происходящими вдоль нормали к плоскости контакта.

Результаты расчета энергии адгезии предложенным методом, показывают удовлетворительное соответствие с результатами, полученными расчетным путем с помощью методов теоретической физики.

**Пятая глава** диссертации полностью посвящена решению задач прикладного значения, требующих своего решения при создании многослойной металлокерамической структуры для стенки проточного тракта жидкометаллического blankets термоядерного реактора на основании описанных в первых четырех главах теоретических результатов.

Стенка проточного тракта работает при высокой, порядка  $700^\circ\text{C}$  температуре. Поэтому в диссертации, опираясь на известные данные о температур-

ной зависимости механических характеристик компонент металлокерамической структуры, построены температурные зависимости энергии адгезии слоев материала, являющихся этими компонентами. По результатам расчетов разработаны предложения и рекомендации по подбору сочетаний функционально необходимых материалов, обеспечивающих высокое значение энергии адгезии, как при низких, так и высоких температурах.

Адгезионный контакт различных материалов по разным причинам не является сплошным. Так что реальная площадь адгезии оказывается меньше кажущейся площади контакта. Одной из причин несплошности является несоответствие физических свойств. В диссертации представлен способ количественной оценки несплошности (поврежденности). Пусть  $dA^{(1,2)}$  – элемент площади кажущегося контакта,  $\alpha$  – та его относительная часть, на которой имеет место истинный адгезионный контакт, а  $(1 - \alpha)$  – та его часть, на которой видимый контакт тел  $B^{(1)}$  и  $B^{(2)}$  есть, но адгезии нет. Тогда  $dA^{(1,2)} = \alpha dA^{(1,2)} + (1 - \alpha) dA^{(1,2)}$ . Предполагается:  $d\bar{u}^{(k)} = \alpha du_{\alpha}^{(k)} + (1 - \alpha) du_{1-\alpha}^{(k)}$ , где  $k = 1, 2$  – номер тела. Тогда суммарная поверхностная энергия  $W_p^{(1,2)}$  оказывается полиномом второй степени параметра  $\alpha$ . Значение этого параметра определяется из условия минимума этого полинома, определяемого равенством  $\frac{\partial}{\partial \alpha} W_p^{(1,2)} = 0$ . Соответствующее выражение получает вид:

$$\alpha = \left( 1 + \frac{2W_{\alpha\alpha} - W_{\alpha(1-\alpha)}}{2W_{(1-\alpha)(1-\alpha)} - W_{\alpha(1-\alpha)}} \right)^{-1} \quad (21)$$

В этом выражении  $W_{(k,m)}$ ,  $k, m = \alpha, 1 - \alpha$  – работа обобщенных сил, возникших вблизи участка  $k$  на обобщенных перемещениях участка  $m$ . На основании этой формулы получены зависимости энергии адгезии и относительной площади адгезионного контакта от безразмерных параметров  $\xi = \frac{E_1}{E_2}$  и  $\theta = \frac{\nu_2}{\nu_1} \cdot \frac{(1 - \nu_1)}{(1 - \nu_2)}$ . Получено условие достижения максимального значения

$$\alpha_{\max} = 1 \text{ для разных материалов: } \frac{E_1}{E_2} = \frac{\nu_1}{\nu_2} \cdot \frac{(1 - \nu_2)}{(1 - \nu_1)}$$

Учитывая, что для жидкометаллического blankets ТЯР в качестве конструкционного материала предполагается использовать сплав ванадий-хром-титан (V – Cr – Ti), а качестве одной из компонент электроизоляционного барьера нитрид алюминия (AlN), обладающий низкой энергией адгезии (подтверждено как расчетом, так и опытом) с (V – Cr – Ti), были проведены расчеты величин  $\alpha$  и  $F_\alpha$  для представляющих практический интерес материалов, который можно использовать в качестве промежуточных между ними и обладающих с ними хорошей адгезией. В результате расчетов сделаны практические рекомендации, использованные для создания технологии изготовления металлокерамической стенки проточного тракта жидкометаллического blankets термоядерного реактора.

Разработаны также практические рекомендации по обеспечению оптимального процентного состава компонент сплава (V – Cr – Ti). [1–7]

## Заключение

В диссертации содержится решение задачи по энергетической оценке прочности соединения слоистых композиционных материалов в рамках градиентной теории упругости путем определения энергии адгезии их элементов с помощью одномерной математической модели адгезионного контакта их элементов, имеющее существенное значение для теории упругости.

**В ходе выполнения диссертационного исследования получены следующие основные результаты:**

1. Обосновано применение теории упругости материалов второго порядка для энергетической оценки прочности соединения слоистых композиционных материалов путем определения энергии адгезии адгезии конструкционных материалов сложного состава и структуры.
2. Разработана математическая модель образования микротрещин поверхностного слоя, позволяющая наиболее точно оценивать величину по-



верхностной энергии, применяемой при расчете энергии адгезии.

3. Разработана на основе градиентной теории упругости математическая модель адгезионного контакта элементов слоистого композиционного материала, позволяющая рассчитать энергию их адгезии при наличии или отсутствии нарушений его сплошности.
4. Разработаны научно-обоснованные рекомендации и методики по рациональному выбору состава слоистого композиционного материала, обеспечивающему его высокую прочность и целостность при различных температурных режимах.

### Основные публикации по теме диссертации:

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.

5. 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.
6. Витковский, И. В. Методология формирования многослойных структур жидкометаллического blankets термоядерного реактора / И. В. Витковский, А. Н. Конев, С. А. Леонов и др. // **Приборы и техника эксперимента**. — 2012. — Т. 4. — С. 89–94.
7. 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 12 ноября 2013 г.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № 1310

Отпечатано с готового оригинал - макета на полиграфической базе

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