На правах рукописи

# Кузин Алексей Константинович

## ТЕРМОУПРУГИЕ ДЕФОРМАЦИИ И ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ В ФОРМЕ НАКЛАДОК И ПЛАСТИН

Специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

## ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель:	Елисеев Владимир Васильевич
	доктор физико-математических наук,
	профессор.
Официальные оппоненты:	Федоров Александр Сергеевич
	доктор технических наук, профессор.
	ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский
	государственный морской технический
	университет».
	Смирнов Андрей Леонидович
	кандидат физмат. наук, доцент.
	Санкт-Петербургский государственный
	университет.
Ведущая организация:	Акционерное Общество «НИИЭФА им.
	Д.В. Ефремова».

Защита состоится 14 октября 2015г. в 16 часов на заседании совета Д 212.229.05 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29, ауд. 265 2-го учебного корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».и на сайте <u>http://www.spbstu.ru</u>.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_ 2015 года.

m

Ученый секретарь

диссертационного совета

Воробьева Татьяна Владимировна

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

#### Актуальность темы.

Конструктивные элементы в виде накладок и облицовочных пластин широко распространены в современных технике и строительстве. При проектировании, монтаже и эксплуатации таких элементов основной интерес обычно вызывает состояние границы между накладкой и основанием и, в особенности, края этой границы. Именно зона интерфейса, как правило, определяет прочность крепления облицовки и работоспособность всей конструкции.

Напряженно-деформированное состояние (НДС) материала вблизи границы прилегания накладки к основанию сильно отличается от состояния в глубине накладки и зависит от способа ее крепления (клеевое соединение, сварка, пайка и т.д.). Концентрация напряжений вблизи интерфейса и, в особенности, на границе зоны контакта накладка/основание делает актуальным применение специальных моделей, позволяющих работать с сингулярными полями напряжений и деформаций. Такую роль, например, играет модель входящего угла — секториального выреза в упругом пространстве с нагрузками на бесконечности — естественного обобщения на случай окрестности угловой точки модели разреза-трещины в классической механике разрушения. Эта постановка востребована во многих задачах механики и область ее применения определяет специфику структуры входящего угла.

#### <u>Цель работы</u>

Анализ НДС и оценка прочности конструкционных элементов в виде облицовки, накладок и пластин в условиях силовых и тепловых воздействий методом расщепления пространственной задачи с выделением сингулярностей.

#### Задачи исследования

 Определение параметров асимптотического НДС окрестности края интерфейса накладка/основание как линейно-упругого входящего угла. НДС в этом случае задается асимптотическим решением фиксированной структуры и обобщенными коэффициентами интенсивности (КИН), зависящими от состояния исследуемой конструкции в целом.

- Разработка методики вычисления обобщенных коэффициентов интенсивности асимптотического НДС входящего угла при силовых и температурных воздействиях и ее программная реализация.
- 3. Вычисление параметров асимптотического НДС на границах интерфейса облицовка/основание первой стенки токамака для последующей оценки прочности ее крепления.
- 4. Построение и анализ модели термоупругой накладки как альтернативного подхода к исследованию прочности крепления тонкой облицовки.
- 5. Вывод и решение уравнений пластин со структурой для обработки экспериментальных данных.

#### Основные положения, выносимые на защиту

- Вариант метода вычисления обобщенных КИН для области с входящим углом на основе теоремы взаимности работ. КИН находится по результатам конечно-элементного моделирования с учетом как механических, так и тепловых воздействий.
- Методика и результаты исследования прочности крепления облицовки макета фрагмента первой стенки токамака на основе анализа обобщенных КИН на краю интерфейса облицовка/основание.
- 3. Модель термоупругой накладки с учетом поперечного обжатия, построенная вариационным методом.
- 4. Асимптотический алгоритм расчета НДС слоистых пластин для обработки экспериментов.

### Методы исследования

Результаты работы получены на основе применения математических методов теории упругости, основных положений линейной механики разрушения с использованием пакетов компьютерного моделирования Matlab, Mathematica и CAE–системы ANSYS.

## Научная новизна

- 1. Предложен метод расщепления с выделением сингулярностей для расчета НДС конструкций с концетраторами в виде входящего угла.
- 2. Разработан алгоритм определения КИН для области с входящим углом на основе теоремы взаимности работ с учетом температурных воздействий.
- 3. Построена методика оценки прочности крепления бериллиевой облицовки первой стенки токамака на основании асимптотических формул линейной механики разрушения.
- 4. Создана модель термоупругой накладки, позволяющая оценить прочность прилегания накладки к основанию в терминах сосредоточенных сил.

### Достоверность научных результатов

Достоверность результатов обеспечена строгостью применяемого математического аппарата, сравнительным анализом решений, полученных автором, с результатами описанных в литературе экспериментов, использованием средств компьютерной математики и CAE–системы ANSYS.

#### Практическая ценность

Изложенный подход позволяет прогнозировать предельные нагрузки на конструкционный элемент на основании результатов калибровочных экспериментов, что дает возможность сократить объем натурных экспериментов.

### Апробация работы.

Результаты работы докладывались на

- 1. объединенном семинаре СПбГУ и ПГУПС «Компьютерные методы в механике сплошной среды» в Санкт-Петербургском государственном университете путей сообщения (СПбГУПС), (2011),
- международной конференции 13-th International Workshop on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications and 1-st International Conference on Fusion Energy Materials Science (PFMC-13/FEMaS-1, Rosenheim, 2011),

- 70-й (2012) и 71-й (2013) конференциях «Научно-методическая и научноисследовательская конференция, Московский Автомобильно-дорожный Государственный Технический Университет (МАДИ)»,
- 4. семинаре по прикладным задачам механики в Институте Проблем Машиноведения РАН (ИПМаш РАН), (2014),
- 5. семинаре академика Н. Ф. Морозова в Институте Проблем Машиноведения РАН (ИПМаш РАН), (2015).

### <u>Публикации</u>

Основные результаты исследований опубликованы в 8 работах, в том числе в 3-х, изданных в журналах из списка ВАК РФ, 1 — в иностранном реферируемом журнале.

#### Структура и объем диссертации

Работа изложена на 140 машинописных листах, состоит из введения, 5 глав и заключения, содержит 59 рисунков и 2 таблицы. Список цитируемой литературы состоит из 103 наименований.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, показана научная новизна исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту. Приведено краткое описание работы.

В главе 1 изложен подход к оценке прочности границы накладка/основание в духе линейной механики разрушения; этому посвящен §1.1. Напряженно-деформированное состояние (НДС) окрестности края границы описывается с помощью сингулярных асимптотических формул, содержащих неизвестные множители — обобщенные коэффициенты интенсивности напряжений (КИН). Материалы изотропны и НДС есть суперпозиция плоской и антиплоской деформации в плоскости, нормальной к ребру границы. В обоих случаях задача сводится к построению сингулярных решений однородных уравнений линейной теории упругости с однородными условиями в напряжениях на радиальных границах сектора.

Асимптотическое решение этой постановки всесторонне изучалось в работах Вильямса (М. L. Williams), Зака (А. R. Zak), Дандерса (J. Dundurs), Синклера (G. B. Sinclair), О. К. Аксентян, А. И. Каландия, В. Г. Мазья, Б. А. Пламеневского, С. А. Назарова и др. Следуя подходу этих авторов, асимптотически главный член строится в виде

$$\boldsymbol{u} = Kr^{\lambda+1}\boldsymbol{U}(\theta), \qquad \underline{\boldsymbol{\tau}} = Kr^{\lambda}\underline{\underline{\boldsymbol{\Phi}}}(\theta),$$
(1)

где u — вектор перемещений,  $\underline{\tau}$  — тензор напряжений, r и  $\theta$  — полярные координаты в плоскости, перпендикулярной ребру, начало координат находится в угловой точке,  $\underline{\Phi}$  и U — ограниченные функции  $\theta$ .  $\lambda$ ,  $\underline{\Phi}$  и U определяются из условия нетривиальной разрешимости системы алгебраических уравнений, вытекающих из граничных условий на радиальных границах выреза и требований непрерывности на линиях раздела различных материалов. Условие ограниченности энергии упругой деформации и требование сингулярности главного члена решения устанавливают диапазон допустимых показателей степени:  $-1 < \lambda < 0$ . Формулы (1) содержат неизвестный коэффициент K — обобщенный КИН, который может быть определен только с учетом всех приложенных к телу нагрузок.

Основное внимание в главе 1 диссертации уделено конфигурациям, изображенным на рисунке 1. Конфигурация 1.а позволяет моделировать ребро изолированного элемента облицовки, 1.б — щель между соседними элементами. Материалы секторов 1 и 2 изотропные, линейно-упругие с модулями сдвига  $\mu_k$  и коэффициентами Пуассона  $\nu_k$ , k = 1, 2. Известно, что в условиях антиплоской деформации для обоих вариантов при любых соотношениях упругих модулей секторов существует значение  $\lambda$  в интервале (-1;0), определяемое отношением модулей сдвига материалов  $m = \mu_2/\mu_1$  и представимое в явном виде. При плоской деформации показатели степени  $\lambda$  для обеих конфигураций определяются значениями параметров Дандерса:

$$\alpha = \frac{m\left(\kappa^{(1)}+1\right)-\left(\kappa^{(2)}+1\right)}{m\left(\kappa^{(1)}+1\right)+\left(\kappa^{(2)}+1\right)}, \quad \beta = \frac{m\left(\kappa^{(1)}-1\right)-\left(\kappa^{(2)}-1\right)}{m\left(\kappa^{(1)}+1\right)+\left(\kappa^{(2)}+1\right)}$$

Индекс в скобках — номер материала,  $\kappa = 3 - 4\nu$ .



Рис. 1: Модели окрестности ребра крепления накладки.

Для конфигурации 1.а, в зависимости от значений параметров  $\alpha$  и  $\beta$ , либо существуют два показателя степени  $\lambda$  на интервале (-1; 0), либо таких значений нет. В последнем случае главный член асимптотического решения определяется парой комплексно-сопряженных  $\lambda$  и имеет вид, отличный от (1). В гл. 1 диссертации показано, что для практически значимых комбинаций конструкционных материалов реализуется вариант с вещественными  $\lambda$  и, соответственно, асимптотическим НДС вида (1). Для конфигурации 1.б, в свою очередь, существуют два вещественных  $\lambda$  при любых значениях параметров  $\alpha\beta$ .

В §1.2 дан обзор критериев прочности, пригодных для исследования упругих тел с входящими углами. Простейшим и наиболее естественным представляется силовой критерий прочности в терминах КИН: разрушение образца не происходит, пока КИН *К* находится в диапазоне допустимых значений:

$$K_{*-} < K < K_{*+}$$

Предельные значения  $K_{*-} < 0$  и  $K_{*+} > 0$  должны быть определены экспериментально для данной конфигурации входящего угла.

Нахождение КИН — отдельная задача, требующая учета состояния всего образца. §1.3.1 содержит обзор методов вычисления КИН для тел с угловыми вырезами. Основное внимание уделено подходам, при которых КИН определяется на стадии постпроцессорной обработки результатов расчета НДС,

полученных, например, при помощи традиционной конечно-элементной постановки. Это, в первую очередь, методы, использующие поточечную аппроксимацию НДС с помощью асимптотических формул, например, методы экстраполяции и коллокации. Основной недостаток таких подходов — требовательность к точности определения НДС в окрестности угла.

Широкие возможности по вычислению КИН предоставляет известная техника с применением теоремы взаимности работ в окрестности угловой точки. Методу на ее основе посвящен §1.3.2. Рассматривается плоская задача термоупругости в области с угловым вырезом (рисунок 2):

$$\nabla \cdot \underline{\underline{\tau}} + f = 0, \quad \boldsymbol{n} \cdot \underline{\underline{\tau}} \Big|_{\substack{L \cup L_1 \cup L_2 \\ L \cup L_1 \cup L_2}} = \boldsymbol{p},$$

$$\underline{\underline{\tau}} = 2\mu \left( \underline{\underline{\varepsilon}} + \frac{\nu}{1 - 2\nu} \varepsilon \underline{\underline{E}} \right) - 2\mu \alpha \frac{1 + \nu}{1 - 2\nu} \Theta \underline{\underline{E}}, \quad \underline{\underline{\varepsilon}} = \nabla \boldsymbol{u}^S.$$
(2)

Здесь <u>т</u>, <u>е</u>, <u>н</u>, *u*, *n*,  $\nabla$ , соответственно, двумерные тензоры напряжений и деформаций, единичный тензор, вектор перемещений, единичный вектор внешней нормали и набла-оператор.  $\varepsilon$  — след тензора <u>е</u>,  $\Theta$  — температура,  $\alpha$  — коэффициент линейного расширения. Область *F* ограничена контурами *L*, *L*<sub>1</sub>, *L*<sub>2</sub> и *C*.



Рис. 2: Область с угловым вырезом.

Радиус дуги C мал настолько, что на ней решение задачи (2) уже представимо асимптотическими формулами. Взяв в качестве второго состояния асимптотическое НДС вида (1)  $\underline{\tau}_A$  и  $u_A$  с K = 1, получим после некоторых преобразований расчетную формулу для КИН:

$$K = a^{-\lambda} \quad \frac{\int\limits_{C} \boldsymbol{e}_{r} \cdot \left(\underline{\underline{\tau}} - \underline{\underline{\tau}}_{\underline{\Theta}}\right) \cdot \boldsymbol{U} \, dl}{\int\limits_{C} \boldsymbol{e}_{r} \cdot \underline{\underline{\Phi}} \cdot \boldsymbol{U} \, dl},\tag{3}$$

где a — радиус дуги C,  $e_r$  — радиальный орт полярной системы координат,  $\underline{\tau}_{\Theta}$  определено выражением:

$$\underline{\underline{\tau}}_{\Theta} = -2\mu \frac{1+
u}{1-2
u} \alpha \Theta \underline{\underline{E}}.$$

Для применения формулы (3) нужно знать решение системы (2), найденное, например, с помощью метода конечных элементов (МКЭ). При этом точное значение КИН достижимо при неограниченном уменьшении радиуса дуги *C*.

В главе 2 описан ряд задач для областей с входящими углами. Непосредственный расчет КИН выполнен с помощью программы, созданной автором в среде Matlab. Вспомогательные задачи термоупругости решены с использованием ANSYS. §2.1–2.4 в основном посвящены исследованию характера приближения решения к точному значению КИН в зависимости от параметров задачи и численной процедуры.

В §2.5 рассмотрена проблема прогнозирования прочности соединения внахлёстку (Single Lap Joint) на основе методов линейной механики разрушения. Целью расчета была оценка качества предсказания предельной силы как функции длины перекрытия по результатам калибровочного эксперимента на основании силового критерия прочности.

За основу были взяты результаты экспериментов по определению предельной растягивающей нагрузки, приложенной к образцам Single Lap Joint при различных длинах перекрытия пластин l, описанные в работе Lucić, M. Investigation of aluminum single lap adhesively bonded joints / M. Lucić, A. Stoić, J. Kopač // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. — 2006. — Vol.15, no.1–2. — pp.79–87. Материал пластин — алюминий:  $E = 70 \,\Gamma\Pi a$ ,  $\nu = 0.3$ ,  $\sigma_T = 115 \,\mathrm{M\Pi a}$ ; связующее — эпоксидный клей:  $E = 1.4 \,\Gamma\Pi a$ ,  $\nu = 0.35$ ,  $\sigma_T = 38 \,\mathrm{M\Pi a}$ . Геометрические размеры образцов (рисунок 3):  $a = 30 \,\mathrm{mm}$ ;  $b = 90 \,\mathrm{mm}$ ;  $s = 1.95 \,\mathrm{mm}$ ;  $d = 0.15 \,\mathrm{mm}$ .



Рис. 3: Размеры экспериментального образца.

В силу линейности задачи предельной нагрузке  $q_*$  при длине перекрытия

*l* соответствует предельный КИН во входящем углу на краю границы прилегания пластин:

$$K_{*} = q_{*}(l) K_{(1)}(l)$$

 $K_{(1)}(l)$  — КИН, соответствующий приложению единичной нагрузки. Зависимость  $K_{(1)}(l)$  определяется численно, НДС образца для вычисления КИН находится с помощью ANSYS в условиях плоской деформации. В силу независимости  $K_*$  от l получим:

$$q_{*}\left(l
ight)=q_{*0}rac{K_{\left(1
ight)}\left(l_{0}
ight)}{K_{\left(1
ight)}\left(l
ight)}.$$

 $l_0$  и  $q_{*0}$ , соответственно, длина перекрытия и предельная нагрузка в калибровочном эксперименте. В качестве калибровочного был взят эксперимент при  $l_0 = 20$  мм. Соответствующие расчеты предельной нагрузки были выполнены для постановок с учетом (рисунок 4, сверху) и без учета клеевого слоя (рисунок 4, снизу). Результаты вычислений и экспериментальные точки из указанной статьи представлены на рисунке 5. Не смотря на принципиальное различие асимптотических решений, обе постановки дают близкие значения и хорошо прогнозируют предельную нагрузку при длине перекрытия 20 - 40 мм. Потеря несущей способности при l = 60 мм, согласно цитируемой работе, происходит вне области перекрытия из-за разрыва алюминиевой пластины, а потому эта точка должна быть исключена из рассмотрения.

В главе 3 изложены результаты исследования прочности крепления облицовки элемента первой стенки токамака. Непосредственно примыкая к нагретой плазме, первая стенка испытывает воздействие мощных тепловых потоков, что приводит к возникновению поля температурных напряжений. Естественными концентраторами напряжений оказываются входящие углы на границах областей прилегания бериллиевых плиток к поверхности первой стенки. В главе приведены результаты расчетов КИН на границе прилегания плиток, что может помочь в выборе оптимальной конфигурации облицовки первой стенки. Дополненные результатами калибровочных экспериментов, эти данные могут служить основой для определения максимально допустимой

интенсивности теплового потока для выбранного варианта облицовки первой стенки.



Рис. 4: Центральные области моделей с учетом (сверху) и без учета (снизу) клеевого слоя.



Рис.5: Зависимость предельной растягивающей нагрузки (МПа) от длины перекрытия.

В §3.1 описаны исследуемые макеты фрагментов первой стенки. Внешний вид макета представлен на рисунке 6, схемы укладки облицовки на рисунке 7. Пунктирные линии на рис. 7 — надрезы в плитках такой глубины, что до поверхности охладительного канала остается слой материала 2 мм. Задачей исследования был выбор конфигурации и толщины плиток (рассматривались плитки толщины 6 и 8 мм), обеспечивающих наибольшую прочность крепления облицовки к поверхности первой стенки.

В §3.2 описаны постановки и результаты решения задач термоупругости для исследуемых макетов с использованием САЕ пакета ANSYS. Моделирование включало в себя решение задачи стационарной теплопроводности с



учетом физической нелинейности и расчет температурных напряжений.

Рис. 6: Макет фрагмента первой стенки токамака (слева). Справа — охладительный канал этого же макета в разобранном виде.



Рис. 7: Схемы укладки облицовки: тип 1 — сверху, тип 2 — снизу.

В §3.3 дан сравнительный анализ состояния ребер на границе прилегания плиток к плоскости первой стенки на основе модели входящего угла. Ширина щелей между плитками (1 мм) существенна по сравнению с характерной толщиной стенок охладительного канала, поэтому была выбрана модель 1.а (рисунок 1).

Свойства материалов плитки (бериллий) и основания (бронза) таковы, что во всем диапазоне рабочих температур при плоской деформации реализуется состояние с вещественными  $\lambda$  и степень сингулярности в плоской постановке выше, чем в антиплоской. Поэтому суждение о прочности ребер делалось на основании сравнения КИН при плоской деформации. На рисунке 8 приведены значения КИН на всех ребрах, вычисленные на одинаковом расстоянии от края макета. Номер ребра следует читать так: цифра означает номер разреза (см. рис. 7), L и R, соответственно, его левый и правый берега. КИН во всех случаях отрицательный, что, в отличие от задачи о трещине при нормальном отрыве также представляет опасность, т.к. в случае углового выреза разделения НДС на отрыв и сдвиг, как правило, не происходит. Из рисунка 8 видно, что предпочтение следует отдать плиткам небольшим в плане и малой толщины, что качественно согласуется с результатами известных экспериментов (например, Mazul, I. Russian development of enhanced heat flux technologies for ITER first wall / I. Mazul, A. Alekseev et al. // Fusion Engineering and Design. — 2012. — Vol.87, no.5–6. — pp.437–442). Наконец, в §3.4 аналогичные расчеты выполнены для образца с дополнительными надрезами в облицовке. Показано, что надрезы существенно снижают КИН на ребрах плиток, почти не оказывая влияния на температуру границы плитка/основание.

В главе 4 рассмотрен подход к плиткам, как к упругим накладкам с заданной аппроксимацией перемещений по толщине. Вытекающая из принципа виртуальной работы система уравнений для изолированной накладки аналогична модели пластины Рейсснера-Миндлина, но усложнена учетом поперечной деформации от действия продольной нагрузки. Так как исследуются именно накладки, то все внимание уделено постановкам, когда слой лежит на основании (упругом, жестком, или другом слое): именно в этом случае слой превращается в упругую накладку. Такой подход предоставляет альтернативу исследованию прочности соединения на основе механики разрушения. Концентрация напряжений на ребре входящего угла при этом характеризуется не параметрами асимптотических формул, а сосредоточенными силами, возникающими на границе прилегания накладки к основанию.

В §4.1 получена система двумерных уравнений в общем виде, §4.2 посвящен рассмотрению накладок в условиях плоской деформации. В последнем случае проблема сводится к системе линейных обыкновенных дифференциальных уравнений.

В §4.3 приведены полуаналитические примеры задач с накладками. В частности, в §4.3.2 подход проиллюстрирован на примере задачи о прогнозировании прочности соединения внахлёстку из §2.5. Соединение моделируется

14

конструкцией, состоящей из полос-накладок, что приводит к краевой задаче для системы линейных уравнений с постоянными коэффициентами, допускающей решение в Mathematica. Кривая максимально допустимой нагрузки при этом почти совпадает с полученной в §2.5 на основе анализа КИН.





Рис. 8: Значения КИН при толщине плиток 6 и 8 мм.

Изложенная в главе 4 модель накладки позволяет описать концентрацию напряжений вблизи краев. Модель содержит естественный малый параметр — толщину накладки, что позволяет говорить о возможности асимптотического решения задачи.

Глава 5 посвящена асимптотическому решению трехмерной проблемы линейной термоупругости для тонких пластин при произвольной анизотропии

и неоднородности материала. Решение строится как главный член асимптотического разложения по степеням формального параметра, характеризующего малость толщины пластины. Применяется метод сращивания асимптотических разложений, согласно которому следует строить, как минимум, два разложения: внешнее и внутреннее. Внешнее характеризует медленно меняющееся в плоскости пластины решение и хорошо описывает НДС исходной задачи вдали от краев. В окрестности боковой границы строится быстро убывающее внутреннее разложение, обеспечивающее точное выполнение граничных условий. Так как оба разложения представляют собой одно и то же решение, то должна существовать область, в которой внешнее разложение переходит во внутреннее. На этом принципе основана процедура сращивания, позволяющая сформулировать граничные условия для уравнений внешнего разложения и тем самым окончательно его определить.

В заключительном параграфе главы 5 рассмотрена модельная задача о термоупругой слоистой пластине. Это решение может быть, например, использовано как основа для эксперимента по определению коэффициента Пуассона слоев.

В заключении перечислены основные результаты работы:

1. Определены параметры асимптотического НДС окрестности края интерфейса плитка/основание. Показано, что в области практически значимых соотношений упругих модулей плитки и основания показатели степеней сингулярных составляющих НДС вещественные.

2. Предложена и реализована в виде программы в среде Matlab модификация методики вычисления коэффициентов интенсивности напряжений для входящего угла на основе теоремы взаимности работ, учитывающая влияние температурных воздействий.

3. Модель входящего угла применена для исследования прочности крепления облицовки макета фрагмента первой стенки токамака при воздействии стационарного теплового потока. Показано, что коэффициент интенсивности на краю интерфейса плитка/основание, соответствующий

16

наиболее сингулярному члену НДС, возрастает по мере приближения к углу плитки, что усложняет оценку прочности крепления в рамках рассматриваемой модели в условиях плоской деформации.

4. Определено, что модель позволяет сделать выводы, качественно согласующиеся с результатами экспериментов с фрагментами первой стенки. Это. во-первых, предпочтительность использования плиток небольших во-вторых, положительное на размеров В плане, влияние прочность дополнительных технологических разрезов в облицовке без сколько-нибудь существенного увеличения температуры во фрагменте первой стенки.

5. Построена двумерная модель тонкой упругой накладки с заданной аппроксимацией перемещений по толщине, учитывающая поперечное обжатие. Модель предоставляет альтернативный подход к оценке прочности скрепления конструкционных элементов в виде тонких слоев и покрытий. На контуре интерфейса накладка/основание возникает концентрация напряжений, но значения напряжений остаются конечными. При этом, в общем случае, на контуре возникают контурные силы. Критерий прочности крепления накладки формулируется в терминах контурных сил по аналогии с силовым критерием механики разрушения, сформулированным в терминах коэффициентов интенсивности напряжений.

6. По экспериментальным данным, приведенным в литературе, вычислены предельные нагрузки для лабораторного образца соединения внахлестку в зависимости от длины перекрытия. Расчеты с использованием моделей входящего угла и упругой тонкой накладки дают близкие результаты.

7. Для обработки экспериментов со слоистыми пластинами выведены асимптотические формулы, описывающие НДС этих пластин.

## Список публикаций по теме диссертации

#### В изданиях из перечня ВАК:

Елисеев, В. В. Линейно-упругое поведение тонких пластин со структурой
 / В. В. Елисеев, А. К. Кузин // Научно-технические ведомости СПбГТУ. —
 2000. — Т. 21. — №3. — С. 134–137.

17

Елисеев, В. В. Математическое моделирование и оценка прочности линейно-упругого тела в окрестности углового выреза / В. В. Елисеев, А. К. Кузин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2011. — Т. 133. — № 5. — С. 68–73.

3. Елисеев, В. В. О расчете прочности металлоконструкций при хрупком разрушении / В. В. Елисеев, А. К. Кузин, Н. Е. Стариков // Известия Тульского государственного университета (серия технические науки). — 2014. — Вып. 12. ч. 1. — С. 181–187.

#### В изданиях, индексируемых Scopus:

4. Vetyukov, Y. Asymptotic splitting in the three-dimensional problem of elasticity for non-homogeneous piezoelectric plates / Y. Vetyukov, A. Kuzin, M. Krommer // Int. J. of Solids and Structures. — 2011. — Vol.48, no.1. — pp.12–23.

## В прочих изданиях:

5. Елисеев, В. В. Упругие накладки и концентрация напряжений у их края / В. В. Елисеев, А. К. Кузин // Тезисы докладов 71-й научно-методической и научно-исследовательской конференции Московского автомобильнодорожного государственного технического университета (МАДИ). — М.: Издво МАДИ, 2013. — С. 25–27.

6. Кузин, А. К. Концентрация напряжений и прочность конструкций с входящими углами / А. К. Кузин // «Вопросы строительной механики и надежности машин и конструкций». Сборник научных трудов Московского Автомобильно-дорожного Государственного Технического Университета. — М.: Изд-во МАДИ, 2012. — С. 92–103.

7. Кузин, А. К. Численный анализ прочности облицовки на основе линейной механики разрушения / А. К. Кузин // Труды семинара «Компьютерные методы в механике сплошной среды». 2011–2012 гг. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 2012. — С. 25–39.

8. Eliseev, V. Fracture mechanics approach to Be/bronze joint structural assessment / V. Eliseev, A. Kuzin, I. Mazul, et al. // PFMC-13/FEMaS-1, Book of Abstracts. — 2010. — p.236.