

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ИНСТИТУТ
ГОСУДАРСТВЕННОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи



Кисель Екатерина Сергеевна

**ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ТЕРМОУПРУГОСТИ ДЛЯ
КУСОЧНО-НЕОДНОРОДНЫХ ТЕЛ С НЕГЛАДКОЙ ГРАНИЦЕЙ**

Специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Автомобильно-дорожном институте Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка.

Научный руководитель: **Вовк Леонид Петрович**, доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Наседкин Андрей Викторович**, доктор физико-математических наук, профессор, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича Южного федерального университета (г. Ростов-на-Дону), главный научный сотрудник.

Калоеров Стефан Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донецкий национальный университет» (г. Донецк), профессор кафедры теории упругости и вычислительной математики.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Донской государственный технический университет**» (г. Ростов-на-Дону).

Защита состоится 21 декабря 2018 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 01.016.03 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Донецкий национальный университет» по адресу: 83001, г. Донецк, проспект Театральный, 13, ауд. 264.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет» по адресу: 83001, г. Донецк, ул. Университетская, 24, <http://science.donnu.ru>.

Автореферат разослан _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.016.03
доктор технических наук, профессор



В.К. Толстых

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В результате активного развития машиностроения, тепловой и атомной энергетики, химической и аэрокосмической промышленности значительно увеличилось производство и применение разъемных и неразъемных соединений, выполненных из материалов, сочетающих в себе различные физико-механические свойства. Подобные конструкционные особенности, широкое применение различных видов сварки, технологические пластические деформации при соответствующих рабочих нагрузках, возникающая локальная концентрация напряжений (ЛКН) часто создает возможность возникновения как технологических, так и эксплуатационных повреждений в потенциально опасных зонах. Для обеспечения необходимых эксплуатационных качеств составных конструкций, метод исследования подобного рода зон обязательно должен учитывать возможность качественного и количественного определения степени концентрации напряжения, роль температурных полей и термоупругих волн в процессе ее возникновения, т. е. возможность возникновения краевых и граничных эффектов и их интенсивность. Необходимость одновременного учета большого количества факторов: связанности полей деформации и температуры, сложности формы исследуемых областей, их физической неоднородности, условий нагрузки, обуславливает значительные математические трудности расчета распределения напряжений в твёрдом термоупругом неоднородном теле. Однако именно перечисленные факторы являются причиной появления новых волновых эффектов. Поэтому в динамических задачах теории термоупругости особо актуальной представляется оценка роли физической и геометрической неоднородности в формировании спектра и форм колебаний исследуемой неоднородной области, что мотивирует к поиску новых и совершенствованию существующих методов решения граничных задач связанной термоупругости для неоднородных тел.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Проведенные в работе исследования связаны с конкурсными научными проектами «Разработка методов исследования упругого состояния тел под действием механических, температурных и электромагнитных полей, их применение» (МОНУ, № госрегистрации 0108U001594, 2008–2010 гг.), «Исследование вязкоупругого и электромагнитоупругого состояния многосвязных сред» (МОНУ, № госрегистрации 0111U000406, 2011–2013 гг.), а также с разрабатываемой в настоящий момент по плану НИР АДИ ГОУ ВПО «ДонНТУ» научно-исследовательской работой Н-2018-03 «Численно-аналитические модели термодинамического деформирования и разрушения неоднородных областей с негладкой границей». Основные результаты работы использованы в отчетах по указанным НИР.

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка численно-аналитического метода решения плоских динамических задач связанной термоупругости для неоднородных изотропных тел с негладкой границей, исследование влияния термоупругих и геометрических

характеристик тел на характеристики волнового поля. Для достижения указанной цели были поставлены следующие основные задачи:

- распространить алгоритм метода суперпозиции для расчёта, в рамках теории плоской деформации конечных термоупругих кусочно-неоднородных тел, динамического НДС (напряженно-деформированного состояния) в окрестности сингулярных зон границы;
- получить решения конкретных граничных задач термоупругости для плоских однородных и кусочно-неоднородных тел;
- провести полное исследование зависимости краевых и граничных динамических эффектов от температурных, а также геометрических и упругих параметров и определить термомеханические характеристики волнового поля в окрестности угловых точек на примере однородной/неоднородной термоупругой прямоугольной области;
- определить условия проявления тонких динамических эффектов типа краевого и граничного резонансов и проанализировать величину их интенсивности;
- исследовать эффективность метода и достоверность получаемых результатов;
- подтвердить работоспособность полученных численно-аналитических схем, установить критерии возможности их применения.

Объектом исследования являются математические модели волновых деформационных процессов, возникающих в неоднородных твердых телах вблизи особых точек границы.

Предметом исследования являются методы расчета установившихся колебаний конечных изотропных термоупругих кусочно-неоднородных тел с негладкой границей.

Методы исследования. Для аналитического решения поставленных граничных задач был применён модифицированный метод суперпозиции, что позволило свести задачу к системе сингулярных интегральных уравнений с известной асимптотикой неизвестных. А также метод вспомогательных краевых задач, метод выделения особенностей, метод Бубнова–Галёркина, комплекс методов теории колебаний и волн.

Положения, выносимые на защиту:

- разработка метода решения задач термоупругости для однородных и составных термоупругих тел с сингулярной границей, позволяющего дать достоверную оценку учёта влияния температурных параметров на природу краевого и граничного резонанса и интенсивность концентрации напряжений в опасных зонах тела;
- обобщение метода суперпозиции при решении краевых задач установившихся колебаний термоупругих прямоугольных областей, основанного на возможности сведения задачи к системе сингулярных интегральных уравнений с известной асимптотикой неизвестных; определение характера поведения НДС в окрестности сингулярных точек внешних и внутренних границ кусочно-однородных тел с целью

аппроксимации решения и построения эффективного алгоритма его нахождения при численном анализе;

- разработка метода выделения особенностей, расчета и определения характера динамического НДС в окрестности сингулярных точек области;
- алгоритм численно-аналитического расчета ПЛО по напряжениям и анализ влияния температурных эффектов на ПЛО в телах с переменными характеристиками;
- установление механической зависимости краевых и граничных динамических эффектов от температурных, а также геометрических и упругих параметров.

Научная новизна полученных результатов заключается в обосновании и решении вопроса установившихся симметричных колебаний конечных изотропных однородных и кусочно-однородных термоупругих тел с нерегулярной границей, при этом получены такие новые результаты:

- впервые поставлена научная проблема о влиянии температурной составляющей волнового поля на суммарные характеристики динамической ЛКН в неоднородных термоупругих областях с негладкой границей;
- впервые предложен, теоретически обоснован и аналитически реализован новый метод решения краевых задач колебаний конечных изотропных термоупругих областей с нерегулярной границей, путём усовершенствования, обобщения и дальнейшего распространения существующего модифицированного метода суперпозиции на термоупругие области. Данный метод применим при решении связанной задачи термоупругости. В отличие от ранее предложенных методик расчета, учитывается температурная составляющая в асимптотическом анализе поведения неизвестных функций в сингулярных точках границы области;
- впервые введена новая научная категория – ПЛО и разработана новая схема для численно-аналитического их расчета с учётом влияния температурных эффектов, также дано математическое обоснование её применения;
- впервые раскрыты новые закономерности возникновения и развития динамических краевых эффектов и разработан новый математический метод их оценки в кусочно-однородных термоупругих структурах путём анализа асимптотического поведения НДС в нерегулярных точках составного сечения.

Практическая значимость работы. Предложенные методы могут найти своё применение при проведении прочностных расчетов динамического НДС элементов конструкций и деталей машиностроения со сложными физико-механическими свойствами. На основе проведенных исследований выработаны практические рекомендации по снижению уровня термоупругих напряжений в элементах машиностроительных конструкций.

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов основывается на строгости применяемого математического аппарата. Обеспечивается адекватной физической и математической постановками задач, корректным использованием математических методов, проверкой их сходимости, применением сертифицированных программ конечно-элементного

анализа для проведения численного исследования, сравнением результатов аналитических и численных решений, непротиворечивости полученных результатов известным решениям, найденным другими авторами для неоднородных термоупругих тел.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных конференциях: Всеукраинская научно-практическая конференция «Вісник науковця – 2009» Николаев, НУК, 2009 г.; VI Международная научно-практическая конференция «Альянс наук: вчений - вченому» Днепропетровск, ПДАБА, 2009 г.; VII Международная студенческая конференция «Прикладні завдання математики в механіці, економіці та екології» Севастополь, СТМ, (2009 г., 2013 г.); X Международная научно-практическая конференция «Методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике» Новочеркасск ЮРГТУ(НПИ), 2010; IX Международная научно-техническая конференции Ростов-на-Дону, ИЦ ДГТУ, 2010 г.; XIII Міжнародна конференція імені академіка М. Кравчука, Київ, НТУУ, 2010 р.; Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы и пути их решения в науке транспорте и образовании 2011» Одесса, Черноморье, 2011 г.; Международная научно-практическая конференция «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2011» Одесса, Черноморье, 2011г., (2013г.); XIV міжнародна наукова конференція імені академіка М.Кравчука, Київ, НТУУ, 2012 р.; VI всеукраїнська науково-практична заочна конференція «Наука України. Перспективи та потенціал» Запоріжжя, Всеукраїнське громадське партнерство «Нова освіта», 2013 р.; 7th International Scientific Conference «European Applied Sciences: modern approaches in scientific researches»: Papers of the 7th International Scientific Conference. – Stuttgart, Germany, Теоретические и практические проблемы развития науки, 3-я международная науч.-практ. конф., (г. Махачкала, 30 ноября, 2013 г.) – Махачкала: ООО «Апробация»; II Международная научно-практическая конференция (Азов, 19 мая 2015 г.); «Молодёжный форум: технические и математические науки» 9 ноября – 12 ноября 2015 года, г. Воронеж (РФ); XVIII Международной конференции. Южный федеральный университет, 2016 и др.

В полном объеме диссертационная работа докладывалась на объединенном научном семинаре по механике сплошных сред кафедр теории упругости и вычислительной математики, прикладной механики и компьютерных технологий Донецкого национального университета (2017 - 2018 г.г.).

Публикации результатов исследований. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 38 научных работах, из которых 2 статьи в научных изданиях из перечня ВАК ДНР, а также 36 статей в других изданиях, включая тезисы и материалы научных конференций.

Личный вклад соискателя. Все основные научные результаты диссертационной работы получены автором лично. В совместно проведенных исследованиях и опубликованных работах, соавторам Л.П. Вовку [3, 4, 7-10, 12, 15, 16, 17, 20, 21, 25, 27, 30-38], И.А. Моисеенко [2], Б.В. Соболю [10]

принадлежат участие в постановке рассматриваемых задач и рекомендации по методам анализа и обобщения полученных результатов. Соавторам И.В. Даниленко [11], Е.А. Новицкой [28], А.С. Столяровой [29], О.Б. Калашкиковой [16, 17, 21, 22], М.А. Абазе [19], И.А. Матвееву [20] принадлежат участие в осуществлении численных экспериментов в программном комплексе ANSYS на базе Южного федерального университета, а также участие в обработке и систематизации результатов численного анализа. Сведения об используемом программном комплексе ANSYS: бессрочная лицензия №467447 от 22.03.2007, подписана в 2008 году содержит ANSYS Academic Research + AUTODYN + CFD, позволяющая выполнять диссертационные исследования (версия ANSYS 11.0).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованной литературы, который содержит 172 источника, и двух приложений. Общий объем диссертации составляет 143 страницы, из которых основной текст диссертации занимает 119 страниц. Работа содержит 4 таблицы, 30 рисунков. Список литературы составляет 17 страниц, приложения – 7 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе приведен обзор базовой литературы по теме диссертационного исследования, упомянуты работы, относящиеся к смежным областям науки, и описаны аспекты формирования и развития физических представлений и математических моделей теории упругости и термоупругости. Охвачено 172 работы отечественных и зарубежных авторов. Рассмотрена специфика методов решения граничных задач термоупругости, проблемы связанной термоупругости неоднородных тел.

Объем результатов исследований, посвященных анализу сингулярности напряжений в неоднородных термоупругих телах сравнительно невелик. Следует отметить, что при исследовании ЛКН, во-первых, не введены параметры интенсивности ЛКН, аналогичные известным коэффициентам концентрации напряжений, во-вторых, нет анализа особенностей НДС с учетом сингулярности границы области и влияния температурных напряжений на ЛКН. Недостаточную разработанность данных вопросов можно связать с усложнением краевой задачи о вынужденных колебаниях неоднородной термоупругой области и численно-аналитического алгоритма её решения. Это объясняется влиянием на природу динамических эффектов не только геометрических и упругих параметров области, но и температурного фактора.

Таким образом, актуальность данной работы раскрывается анализом вопросов распространения метода суперпозиции для расчета термоупругих неоднородных прямоугольных областей с целью определения характера динамического НДС в окрестности сингулярных точек прямоугольных областей. В целом, разработанность значительного математического аппарата для решения связанных задач термоупругости, не определяет универсальный метод, который обладал бы преимуществами во всех ситуациях. Каждый метод

имеет свою эффективную область применения. Это стимулирует развитие новых методов и алгоритмов решения рассматриваемой проблемы и решение новых задач, представляющих как теоретический, так и практический интерес.

Второй раздел посвящен математическому моделированию процесса постоянных симметричных колебаний конечных изотропных однородных термоупругих областей с нерегулярной границей и аналитическому решению сформулированных краевых задач для тел прямоугольного сечения путём модификации метода суперпозиции и асимптотического анализа поведения неизвестных функций в сингулярных точках границы. Общий алгоритм основного модифицированного метода суперпозиции изложен при решении задачи о свободных постоянных симметричных колебаниях однородного термоупругого тела. Его сечение представляет собой прямоугольную область D , которая занимает в системе координат $\alpha_1 O \alpha_2$ область $D = \{(\alpha_1, \alpha_2) : |\alpha_1| \leq a; |\alpha_2| \leq b\}$, где α_1, α_2 – декартовы координаты.

Предполагается, что свободная граница области имеет свободный теплообмен с внешней средой и находится под действием нагрузки, которая действует в плоскости D . На границах $\alpha_1 = \pm a; \alpha_2 = \pm b$ рассматриваемой области задано нормальное нагружение интенсивности $Q_1(\alpha_1), Q_2(\alpha_2)$ соответственно, которое гармонично изменяется во времени с частотой ω .

Формулируется общая краевая задача относительно безразмерных амплитудных характеристик перемещений $U_i(x, y), i = 1, 2$ и температуры $\Theta(x, y)$ для определения собственных частот и собственных форм колебаний области D . Согласно алгоритму модифицированного метода суперпозиции, общее решение, удовлетворяющее системе уравнений динамической термоупругости внутри области D , конструируем в виде суммы двух частных решений системы. Каждое из них описывает симметричные колебания бесконечных полос, образующих при пересечении область D . При выборе формы частных решений необходимо учитывать возможность удовлетворения при их помощи граничных условий на внешней границе области.

Далее вводится в рассмотрение вспомогательная краевая задача (1):

$$\begin{aligned} U_1(\pm 1, y) = \pm f_1(y), \quad U_2(x, \pm \eta) = \pm f_2(x), \quad \sigma_{12}(\pm 1, y) = 0, \\ \sigma_{12}(x, \pm \eta) = 0, \quad \Theta'_x(\pm 1, y) = f_3(y), \quad \Theta'_y(x, \pm \eta) = f_4(x). \end{aligned} \quad (1)$$

Она, в отличие от исходной краевой задачи, характеризуется заданием на границах нормальных перемещений U_1, U_2 , касательных напряжений σ_{12}, σ_{21} и приращения температуры Θ'_x, Θ'_y . Это позволяет провести ее аналитическое решение. В правых частях новых граничных условий присутствуют неизвестные вспомогательные функции $f_1(y), f_2(x), f_3(y), f_4(x)$.

$f_1(y) = f_1(-y), f_2(x) = f_2(-x), f_3(y) = f_3(-y), f_4(x) = f_4(-x)$, что следует из характера граничных условий (1). Раскладываем эти функции в ряды Фурье на соответствующих отрезках и, используя общее решение задачи, составляем неиспользованные граничные условия исходной краевой задачи. Т.к. все компоненты волнового поля выражены через коэффициенты Фурье

вспомогательных функций, эти условия, после возвращения к неудовлетворённым граничным условиям исходной краевой задачи, представляют систему интегральных уравнений (СИУ) для их определения.

Для построения эффективного алгоритма ее решения исследуются особенности волнового поля в окрестности нерегулярных угловых точек границы сечения, которые характеризуют ПЛО для механических и температурных характеристик волнового поля (λ и β соответственно), т. е. проводится асимптотический анализ НДС в угловых точках сечения. Исследование поведения полученной СИУ при подходе к нерегулярным точкам и ограниченность ее правых частей во всей области приводит, к системе уравнений для определения ПЛО. Из условия существования нетривиального решения данной системы получим характеристическое уравнение (2) для определения параметра λ :

$$\lambda^2 - \sin^2(\pi\lambda/2) = 0, \quad \beta = 0. \quad (2)$$

Уравнение (3) имеет действительный корень $\lambda_0 = 1$ и бесконечное множество комплексных корней $\lambda_k = \tau_k \pm i\sigma_k$. Учитываются лишь те комплексные корни, для которых $\text{Re } \lambda_k > 1$. Характер особенности механического поля в угловой точке не зависит от упругих параметров области. Нахождение показателей локальной особенности λ приводит к эффективной оценке концентрации динамических напряжений в окрестности этих точек, что обуславливает прочностные характеристики всей области. Температура не имеет особенности в угловых точках области.

Третий раздел посвящен распространению алгоритма метода суперпозиции для расчета термоупругих кусочно-неоднородных тел и определения характера динамического НДС в окрестности сингулярных угловых точек области, а также применению разработанной ранее в разделе 2 схемы для численно-аналитического расчета ПЛО по напряжениям и анализу влияния температурных эффектов на ПЛО. Обобщение метода суперпозиции на случай кусочно-неоднородных термоупругих областей изложено при решении задачи о свободных постоянных симметричных колебаниях неоднородного термоупругого прямоугольника с плоскопараллельными границами.

Составляющие область D среды $G^{(m)}$ ($m = 1, 2$) состыкованы друг с другом $D = G^{(1)} \cup G^{(2)}$ (Рисунок 1).

Они определяются неравенствами:

$$G^{(1)} = \{(\alpha_1, \alpha_2) : |\alpha_1| \leq c; |\alpha_2| \leq b\},$$

$$G^{(2)} = \{(\alpha_1, \alpha_2) : \alpha_1 \in [-a, -c] \cup [c, a]; |\alpha_2| \leq b\},$$

где α_1, α_2 – безразмерные декартовы координаты. Области изотропны и, в

общем случае, имеют разные упругие

константы. На границах $\alpha_1 = \pm a$, $\alpha_2 = \pm b$ задано нормальное нагружение интенсивности $Q_1(\alpha_1)$ и $Q_2(\alpha_2)$ соответственно, которое гармонично

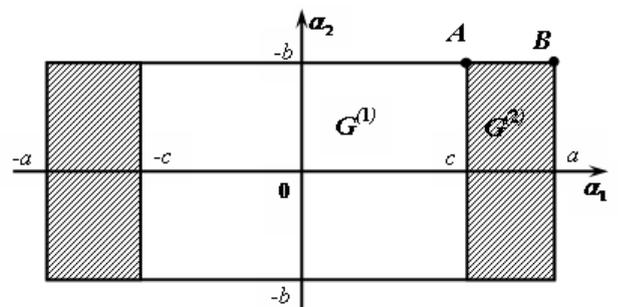


Рис. 1

изменяется во времени с частотой ω . Предполагается, что данная область имеет свободный теплообмен с окружающей средой. Переходим к безразмерным координатам и вводим локальную координату: $x = \alpha_{(1)}/a$, $y = \alpha_2/a$, $\hat{x} = (\alpha_1 - c)/a$, $\hat{x} \in [0, \delta_2]$, $\delta_2 = 1 - \delta$, $\delta = c/a$. Безразмерные амплитудные характеристики перемещений $U_i^{(m)}(x, y)$, $i = m = 1, 2$ и прироста температуры $\Theta(x, y)$ определяются системой уравнений связанной термоупругости в безразмерных координатах для областей $G^{(1)}$ и $G^{(2)}$. На границах для областей $G^{(1)}$ и $G^{(2)}$ формулируются соответствующие силовые и температурные граничные условия таким образом, чтобы были выполнены условия контакта областей с различными термоупругими свойствами. Следуя методу Неймана-Шварца, общее решение конструируется в виде суммы двух частных решений. При выборе формы этих частных решений необходимо учитывать возможность удовлетворения не только граничных условий на внешней границе области, но и условий сопряжения механических и температурных характеристик на границе раздела двух сред.

Аналогично алгоритму для однородного термоупругого прямоугольника, рассматривается вспомогательная краевая задача (3, 4).

Для областей $\bar{G}^{(1)}$ и $\bar{G}^{(2)}$:

$$\begin{aligned} U_1^{(1)}(\delta, y) &= f_1(y), \sigma_{12}^{(1)}(\delta, y) = \varphi_1(y), \left(\Theta^{(1)}\right)'_x(\delta) = f_5(y), \\ U_2^{(1)}(x, \eta) &= f_2(x), \sigma_{12}^{(1)}(x, \eta) = 0, \left(\Theta^{(1)}\right)'_y(\eta) = f_8(x); \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} U_1^{(2)}(0, y) &= f_1(y), \sigma_{12}^{(2)}(0, y) = r_{12}\varphi_1(y), \left(\Theta^{(2)}\right)'_{\hat{x}}(0) = f_5(y), \\ U_2^{(2)}(\hat{x}, \eta) &= f_4(\hat{x}), \sigma_{12}^{(2)}(\hat{x}, \eta) = 0, \left(\Theta^{(2)}\right)'_y(\eta) = f_7(\hat{x}), \\ U_1^{(2)}(\delta_2, y) &= f_3(y), \sigma_{12}^{(2)}(\delta_2, y) = 0, \left(\Theta^{(2)}\right)'_{\hat{x}}(\delta_2) = f_6(y), \end{aligned} \quad (4)$$

где $f_1(y)$, $f_2(x)$, $f_3(y)$, $f_4(\hat{x})$, $f_5(y)$, $f_6(y)$, $f_7(\hat{x})$, $f_8(x)$, $\varphi_1(y)$ – неизвестные вспомогательные функции.

При заданных граничных условиях вид этой вспомогательной задачи значительно усложняется, поскольку при её формулировке необходимо не только добиться аналитического решения, но и ввести граничные условия и условия сопряжения. Это позволяет максимально упростить вид последующей системы интегральных уравнений. Вспомогательная краевая задача предполагает аналитическое решение и даёт возможность удовлетворить часть начальных граничных условий и выразить все характеристики начальной задачи через коэффициенты Фурье неизвестных функций. Для определения введённых вспомогательных функций составляется система интегральных уравнений (СИУ), с использованием неучтённых граничных условий и условий сопряжения составляющих сред.

С целью определения особенностей волнового поля в угловых точках областей $\bar{G}^{(m)}$ проводится исследование решения СИУ. В данной задаче таковыми являются угловые точки стыка областей (A) и внешняя угловая точка

сечения (B). Это позволяет определить асимптотику коэффициентов Фурье неизвестных функций. После суммирования рядов, учитывая асимптотическую значимость неизвестных функций, для соответствующих точек, получим однородную систему (5-8) алгебраических уравнений для определения ПЛО по напряжениям и температуре:

$$\begin{aligned}
 & -m_{12} \sin(\pi\alpha/2)\Phi_1 + 2(n^{(1)} + r_{21}n^{(2)})\sin(\pi\alpha/2)F_1 + 2n^{(1)}\alpha F_2 + 2n^{(2)}r_{21}\alpha\bar{F}_4 = 0, \\
 & (n_{11}^{(1)} + r_{12}n_{11}^{(2)})\sin(\pi\alpha/2)\Phi_1 + 2m_{12} \sin(\pi\alpha/2)F_1 + 2(1 - n^{(1)}\alpha)F_2 + 2(1 - n^{(2)}\alpha)\bar{F}_4 = 0, \\
 & \left((n^{(1)})^{-1} + \alpha \right) \Phi_1 + 2\alpha F_1 + 2\sin(\pi\alpha/2)F_2 = 0, \\
 & \left((n^{(2)})^{-1} + \alpha \right) r_{12}\Phi_1 + 2\alpha F_1 + 2\sin(\pi\alpha/2)\bar{F}_4 = 0; \tag{5}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 4F_5 \cos(\pi\beta/2) + 2F_8 + 2\bar{F}_7 = 0, \quad \bar{F}_7(-\beta)\sin(\pi\beta/2) = 0, \\
 F_8(-\beta)\sin(\pi\beta/2) = 0; \tag{6}
 \end{aligned}$$

$$\sin(\pi\lambda/2)F_3 + \lambda F_4 = 0, \quad \lambda F_3 + \sin(\pi\lambda/2)F_4 = 0; \tag{7}$$

$$F_6(-\gamma)\sin(\pi\gamma/2) = 0, \quad F_7(-\gamma)\sin(\pi\gamma/2) = 0. \tag{8}$$

Исследование решения СИУ проводится соответственно алгоритму, приведенному в разделе 2 для однородной области, однако особенность системы (5-8) состоит в том, что она распадается на четыре части. Первые четыре уравнения, объединенных формулами (5) содержат неизвестные Φ_1 , F_1 , F_2 , \bar{F}_4 и определяют значение α – ПЛО по напряжениям в точке A . Уравнения (6) содержат неизвестные F_5 , \bar{F}_7 , F_8 и определяют значение β – ПЛО по температуре в точке A . Уравнения (7) и (8) (неизвестные F_3 , F_4 и F_6 , F_7) определяют особенность во внешней угловой точке B – ПЛО по напряжениям и температуре λ и γ . Уравнения системы для определения ПЛО β и γ позволяют утверждать, что температура не имеет особенности во внутренних граничных и угловых точках области.

При условии существования нетривиального решения уравнений (5, 6) системы получим характеристическое уравнение аналогичное (2) для определения параметра λ . Оно совпадает с соответствующим уравнением для однородной области. ПЛО по напряжениям α играет достаточно важную роль в прочностном расчёте, поскольку он является определяющим в вопросе интенсивности локальной концентрации напряжений в граничной точке сопряжения двух разнородных сред $A(\delta; \eta)$. Определяя значения ПЛО, как корни характеристического уравнения, из получаемого множества корней этого уравнения следует исключить значения, приводящие к неограниченности энергии. Значение ПЛО зависит от упругих констант стыкуемых сред.

Проведенный анализ влияния температурного поля на спектр

резонансных частот свидетельствует, что оно существенно зависит от частоты для всех рассматриваемых сочетаний геометрических, упругих и температурных параметров. Данный метод анализа волновых полей в нерегулярных точках термоупругого составного сечения предполагает введение важных параметров – ПЛО по напряжениям. В задаче гармонических колебаний термоупругих тел в сингулярных точках границы это параметры для механических и температурных волновых характеристик.

В четвёртом разделе предложены результаты численного анализа характеристик волнового поля для неоднородной термоупругой области. Были проанализированы особенности поведения волновых характеристик в различных средах, неоднородного прямоугольника с точки зрения проявления граничных и краевых динамических эффектов. Рассматривались различные значения упругих и геометрических параметров сечения, с целью определения тех, на которых эти эффекты выражены наиболее отчетливо.

Анализ зависимости ПЛО от соотношения жесткостей стыкуемых сред, показал существенную зависимость ПЛО от упругих параметров внутренней области. На Рисунке 2 представлены графики этой зависимости для случая, когда в качестве материала внутренней области принимались сталь, свинец и вольфрам. В качестве основных параметров выберем отношения (9):

$$r_{2S} = \mu^{(2)} / \mu^{(St)}, \quad \nu_{2S} = \nu^{(2)} / \nu^{(St)}, \quad (9)$$

где $\mu^{(St)}, \nu^{(St)}$ – модуль сдвига и коэффициент Пуассона стали. Пунктирной линией изображены кривые, соответствующие значению $\nu_{2S} = 1,3$, значению $\nu_{2S} = 0,769$ – штрих пунктирной, значению $\nu_{2S} = 1$ – сплошной. Для второго и третьего случаев (материал области $G^{(1)}$ – свинец или вольфрам) коэффициент Пуассона материала внешней области принят фиксированным и равным $\nu^{(2)} = 0,29$.

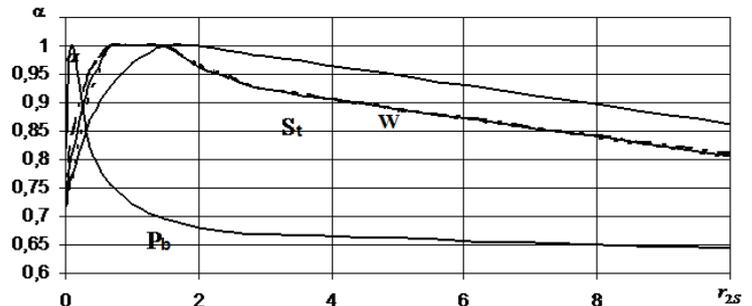


Рис. 2

Очевидно, что параметр α существенно зависит от упругих параметров внутренней области. Для рассмотренных сочетаний упругих постоянных стыкуемых областей не получено комплексных корней характеристического уравнения аналогичного (2) с положительной действительной частью, меньшей единицы. Значение $\alpha = 1$ является корнем характеристического уравнения аналогичного (2), при любых сочетаниях материалов. При сопряжении областей из одинаковых материалов, локальная особенность по напряжениям отсутствует и значение ПЛО α равно единице. При некоторых значениях параметра r_{2S} особенность исчезает и при сопряжении разных материалов, но наименьших положительных корней, больших единицы не возникает ни для каких сочетаний материалов. Размеры диапазона изменения параметра r_{2S} , соответствующие значению $\alpha = 1$, существенно зависят от упругих постоянных

внутренней области. Таким образом, выбор упругих параметров наплавов должным образом позволит минимизировать ЛКН в исследуемой точке. Варьирование значения коэффициента Пуассона материала внешней области оказывает незначительное влияние на величину ПЛО практически при любых соотношениях модулей сдвига стыкуемых областей. При достаточно больших и малых значениях модуля сдвига наплавов значение ПЛО α стабилизируется, стремясь к определенному значению.

Рассмотрен анализ зависимости ПЛО α от соотношения коэффициентов Пуассона стыкуемых областей при фиксированных модулях сдвига.

На Рисунке 3 представлена указанная зависимость для некоторых значений упругих характеристик стыкуемых областей. В качестве значения модуля сдвига внешней области принято значение модуля сдвига свинца. Кривой (1) соответствует случай, когда материал области $G^{(1)}$ – сталь, а кривой (2) – вольфрам. Изменение значения отношения коэффициентов Пуассона определяется, параметром ν_{2s} . Происходит уменьшение параметра особенности при увеличении коэффициента Пуассона материала наплавов, а также при увеличении параметра r_{2s} .

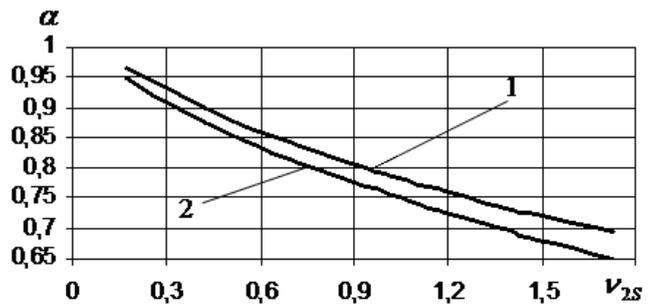


Рис. 3

Наблюдается зависимость спектра резонансных частот от соотношения размеров площадей, занимаемых рассматриваемыми материалами. Для областей, упругие параметры которых близки, значения частот краевого резонанса совпадают либо различаются незначительно, причем неоднородность области способствует понижению значений частот.

Коэффициент линейного температурного расширения не оказывает значительного влияния на собственные частоты исследуемой области, однако для сочетания материалов исследуемой области с ярко выраженной неоднородностью отмечается некоторое усиление влияния коэффициента линейного температурного расширения на значения собственных частот.

Значения резонансных частот растут при увеличении термоупругих характеристик сечения. Так, на Рисунке 4 представлена трёхмерная зависимость $\Omega(\bar{E}, \delta_2)$ для области (Ti-Pb-Ti) с фиксированным значением $L=3$. Здесь $\bar{E} = E/E_{st}$, E_{st} – модуль нормальной упругости стали. Отмечается увеличение значений резонансных частот с ростом общей жёсткости области при любых значениях δ_2 , характеризующего

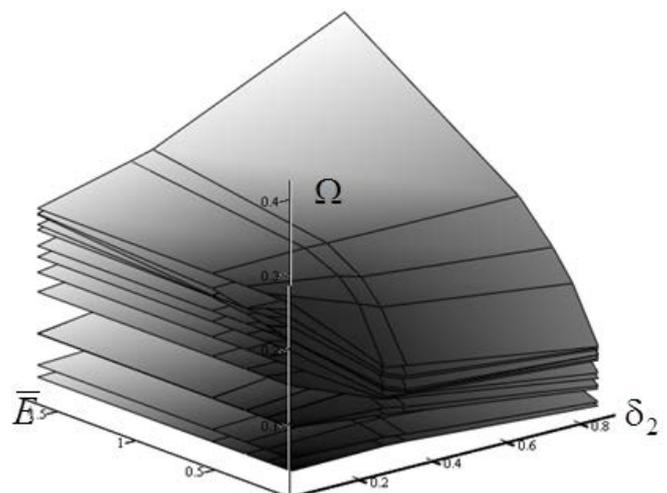


Рис. 4

ширину внешней сопряженной области. С увеличением параметра δ_2 этот рост наиболее заметен, особенно для высоких частот. Что касается линий уровня $\Omega(\bar{E}, \delta_2)$, имеем участки заметного убывания (при малых $\delta_2 < 0,4$) и практически постоянства при дальнейшем увеличении δ_2 (Рисунок 4). Однако отмечается уменьшение частотных значений при увеличении значений геометрического параметра L , что позволяет, варьируя значения геометрических и физико-механических параметров, влиять на значения резонансных частот. Для однородной области частота краевого резонанса существенно зависит от коэффициента Пуассона, повышаясь с его увеличением. Для неоднородной области значения остаются практически неизменными.

Проведен сравнительный анализ энергетической характеристики (\bar{E}) средней за период, накопленной во внутренней области сечения для интегрального описания влияния особенностей волнового поля на вибродинамическое поведение составных тел (Таблица 1).

Таблица 1

№ Ω	$\delta_2 = 0,17$				$\delta_2 = 0,5$				$\delta_2 = 0,9$						
	Ti-Pb-Ti		Pb-Ti-Pb		Ti-Pb-Ti		Pb-Ti-Pb		Ti-Pb-Ti		Pb-Ti-Pb				
	ГР	КР	ГР	КР	ГР	КР	ГР	КР	ГР	КР	ГР	КР			
	т	у	т	у	т	у	т	у	т	у	т	у	т	у	
1		+-						+-	+-	+-	+-		+-		
2		+-						+-		+-	+-		+-	+	+-
3		+-						+-		+	+-		+-	+	
4					+-			+-		+	+			+	+
5					+			+-	+-		+	+	+-	+	
6					+			+		+	+		+	+	
7					+		+-	+-	+	+-			+-	+	+-
8					+		+-	+-	+	+-			+	+-	
9					+			+	+			+	+-		+
10					+			+-	+-	+			+	+	
11					+		+-						+	+	+-
12	+-	+-			+			+-		+	+		+-	+	+-
13	+-		+-		+			+-	+	+-			+-		+-
14		+-			+			+-	+-	+			+-	+	+-
15					+		+	+-		+			+-	+-	

Исследование распределения энергии деформации по площади термоупругого неоднородного сечения на резонансных частотах показало, что наличие неоднородности в сечении резко уменьшает интенсивность краевого резонанса, причем граничный резонанс и краевой резонанс одновременно присутствует в том случае, когда внешняя область обладает более «мягкими» характеристиками. Отмечается меньшее влияние геометрии неоднородности на интенсивность краевого резонанса, т. е. локализация краевых эффектов во

внешних угловых точках и на внешней границе сечения происходит гораздо реже, чем на границе раздела сред.

В целом, интенсивность локальной концентрации напряжений в особых точках сечения напрямую зависит от размера площади сечения, занимаемой более «жестким» материалом. В случае если площадь «жесткого» материала преобладает, имеем признаки граничного резонанса, в обратном случае – слабо выраженный краевой резонанс.

В заключении сформулированы основные обобщенные научные результаты проведенных в работе теоретических и численно-аналитических исследований.

ВЫВОДЫ

1. По проведённому в работе анализу состояния рассматриваемых вопросов, близких по тематике к поднятым в диссертации, можно сказать, что существующие до настоящего времени модели динамических задач термоупругости неоднородных тел и применяемые методы расчета динамической прочности не позволяют их использование для большого класса структурно неоднородных объектов. Они не всегда точно и полно описывают вызванное соответствующим распределением температуры напряженно-деформированное состояние ввиду серьезных математических трудностей, вызванных учетом взаимосвязи тепловых и механических полей и, как следствие, не удовлетворяют современным требованиям практики.

2. Обобщение метода суперпозиции при решении задач установившихся колебаний термоупругих прямоугольных областей позволило свести исследуемую задачу к системе сингулярных интегральных уравнений с известной асимптотикой неизвестных. Дальнейшее определение характера поведения напряженно-деформированного состояния в окрестности нерегулярных точек внешних и внутренних границ кусочно-неоднородных тел даёт возможность при численном анализе наилучшим образом аппроксимировать решение и построить эффективный алгоритм его нахождения. В целом, предложенные этапы исследования являются основой достоверной оценки учёта влияния температурных параметров на природу краевого резонанса и интенсивность концентрации напряжений в опасных зонах сечения области.

3. Впервые, согласно сформулированному в работе общему подходу к решению динамических задач термоупругости для неоднородных областей с точки зрения оценки роли температурных полей и термоупругих волн в процессе возникновения ЛКН дано комплексное исследование большинства динамических характеристик НДС с учётом температурных воздействий на характеристики волнового поля. Разработанный алгоритм решения сформулированных в работе задач носит достаточно универсальный характер и может быть применён для расчета волновых полей при различных силовых и температурных граничных условиях и наличии неоднородности внутренней структуры исследуемых объектов.

4. В работе изучены эффекты локализации волновых движений для однородных и неоднородных термоупругих областей. Как показали результаты исследования, сложность формы исследуемых областей (геометрическая неоднородность), связанность полей деформации и температуры вносят дополнительные математические трудности в расчет распределения напряжений в твёрдом термоупругом неоднородном теле с учётом ЛКН в окрестности внутренних и внешних границ области. Интенсивность возникающей при этом концентрации напряжений определяется введенными критериями – ПЛО по напряжениям и температуре, значения которых определяются упругими и температурными характеристиками областей составного сечения. Найдены определяющие уравнения для расчета значений этих параметров для случаев сопряжения двух различных термоупругих областей. Результаты численного анализа ПЛО, приведенные в работе, позволяют еще на этапе проектирования составного сечения оптимальным образом подбирать сочетания термоупругих характеристик стыкуемых сред с целью минимизации интенсивности ЛКН.

5. Предложенные в работе методы решения граничных задач динамической теории термоупругости использовались для подробного анализа спектров резонансных частот, кинематических (смещений) и энергетических характеристик собственных форм неоднородных областей. Для различных видов сочетаний геометрических, температурных и упругих параметров сечения проанализированы зоны протяженности действия краевых и граничных динамических эффектов; определены условия соотношения этих параметров с целью уменьшения концентрации температурных и динамических напряжений в окрестности внутренних и внешних границ области.

6. Для проверки достоверности предложенных методов выполнено решение отдельных задач, имеющих известные аналитические решения и экспериментальные результаты. Адекватность разработанной методики и численные результаты, полученные в работе с использованием построенных решений граничных задач, сопоставлены с численными результатами, полученными при помощи МКЭ в вычислительном комплексе ANSYS. Дополнительным контролем достоверности в каждой рассматриваемой задаче служила точность удовлетворения граничных условий и условий сопряжения. Можно утверждать, что влияние температурного поля на спектр резонансных частот для кусочно-неоднородной прямоугольной области незначительно, что и подтверждает проведенный КЭ анализ для различных сочетаний геометрических, упругих и температурных параметров двухслойной прямоугольной области: резонансные частоты, рассчитанные с учетом и без учета температурного поля, различаются незначительно.

7. Полученные автором решения задач динамического расчета термоупругих неоднородных тел конечных размеров позволяют выявить основные закономерности динамического деформирования в различных компонентах исследуемых конструкций. Помимо этого, становится возможным существенно сократить объем экспериментальных исследований, необходимых для реализации отдельных этапов инженерных расчётов, в частности, для

установлення благоприятних, с точки зору зниження рівня термопружних напружень в елементах конструкцій, численних значень різних параметрів задачі і функціональних зв'язей між ними. Это, в свою чергу, сприяє зменшенню матеріальних і часових витрат на обробку виробів, дає можливість економічно більш вигідно здійснювати регулювання і контроль технологічних процесів проектування на промислових підприємствах різних галузей. Крім того, на основі запропонованих методів дослідження можуть бути виявлені додаткові фактори, впливаючі на розглядавані питання міцності розрахунків динамічного НДС елементів конструкцій.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Публикации в научных изданиях из перечня ВАК ДНР:

1. Вовк Л.П. Анализ характеристик волнового поля в задачах диагностики неоднородных термопружних областей / Л.П. Вовк, Е.С. Кисель // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2017. – № 1. – С. 28–44.
2. Моисеенко И.А. Распространение волн в анизотропных неоднородных цилиндрах секторного сечения со свободной или жестко закрепленной граничной поверхностью / И.А. Моисеенко, Е.С. Кисель // Вестн. Донецкого нац. ун-та. Сер. А: Естеств. науки. – 2018. – № 2. – С. 36–53.

Публикации в других научных изданиях:

3. Вовк Л.П. Якісний аналіз особливостей концентрації термічних напружень у деталях з нерегулярною границею / Л.П. Вовк, К.С. Кисіль // Вісті Автомоб.-дор. ін-ту. – 2009. – № 1(8). – С. 13–23.
4. Вовк Л.П. Розв'язання крайових задач термопружних областей з негладкою границею / Л.П. Вовк, К.С. Кисіль // Вісник Терноп. держ. техн. ун-ту. – 2009. – Т. 14, № 4. – С.176–180.
5. Кисіль К.С. Асимптотичний аналіз крайових задач еліптичного типу для областей з нерегулярною границею / К.С. Кисіль // Вісник науковця–2009: Зб. матер. Всеукр. наук.-практ. конф., м. Миколаїв, 2 квітня 2009 р. – Миколаїв: НУК, 2009. – С. 288.
6. Кисіль К.С. Метод суперпозицій у розрахунку призматичних термопружних деталей прямокутного перерізу / К.С. Кисіль // Альянс наук: вчений – вченому, VI міжнар. наук.-практ. конф.: Зб. наук. праць, м. Дніпропетровськ, 18-19 березня 2009 р. – Дніпропетровськ: ПДАБА, 2009, Т. 4. – С. 115.
7. Вовк Л.П. Вплив температури на локальну концентрацію динамічних напружень у деталях з нерегулярною границею / Л.П. Вовк, К.С. Кисіль // Прикладні завдання математики в механіці, економіці та екології, VII міжнар. студ. конф.: Зб. наук. праць, м. Севастополь, 15 квітня 2009 р. – Севастополь: СТМ, 2009. – С. 203.

8. Вовк Л.П. Асимптотический метод исследования краевых задач теории термоупругости в областях с негладкой границей / Л.П. Вовк, К.С. Кисель // Методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике: Матер. X междунар. науч.-практ. конф., 26 февраля 2010 г. – Новочеркаськ: ЮРГТУ (НПИ), 2010. – С. 4–6.
9. Вовк Л.П. Інтенсивність динамічної концентрації напружень у задачах сталих коливань кусково-неоднорідних термопружних областей / Л.П. Вовк, К.С. Кисіль // Вісник СумДУ. Сер. Техн. науки. – 2010. – Т. 1, № 3 – С. 20–25.
10. Соболев Б.В. Обобщение метода суперпозиции решения краевых задач теории термоупругости для тел с нерегулярной границей / Б.В. Соболев, Л.П. Вовк, Е.С. Кисель // Инновация, экология и ресурсосберегающие технологии на предприятиях машиностроения, авиастроения, транспорта и сельского хозяйства: Тр. IX междунар. науч.-техн. конф., г. Ростов на Дону, 6-8 октября 2010 г. – Ростов н/Д: ИЦ ДГТУ, 2010. – С. 465–469.
11. Кисіль К.С. Комплексний асимптотичний метод рішення сингулярної системи / К.С. Кисіль, І.В. Даниленко // XIII міжнар. конф. ім. акад. М. Кравчука: Матер. конф., м. Київ, 13-15 травня 2010 р. – Київ: НТУУ, 2010, Т. 2. – С.126.
12. Вовк Л.П. Аналіз спектру резонансних частот термопружних неоднорідних областей с негладкою границею / Л.П. Вовк, К.С. Кисіль // Современные проблемы и пути их решения в науке транспорте и образовании 2011: Тр. Междунар. науч.-практ. конф., Экономика, физика и математика. – Одесса: Черноморье, 2011, Т. 10. – С. 79–84.
13. Кисіль К.С. крайові задачі термопружних областей з негладкою границею / К.С. Кисіль, Р.С. Астанін // XIV міжнар. наук. конф. ім. акад. М. Кравчука: Мат. конф., м. Київ, 19-21 квітня 2012 р. – Київ: НТУУ 2012, Т. 1. – С.72.
14. Кисіль К.С. Исследование спектра резонансных частот упругих и термоупругих областей с негладкой границей / К.С. Кисіль, Т.В. Боднар // XIV міжнар. наук. конф. ім. акад. М. Кравчука: Мат. конф., м. Київ, 19-21 квітня 2012 р. – Київ: НТУУ, 2012, Т. 1. – С.118.
15. Вовк Л.П. Математическое моделирование напряжённо-деформированного состояния неоднородной прямоугольной пластинки с учётом её термоупругих характеристик / Л.П. Вовк, К.С. Кисіль // Наука України. Перспективи та потенціал: Мат. VI Всеукр. наук.-практ. заоч. конф., м. Запоріжжя, 22-23 лютого 2013 р. – Запоріжжя: Всеукр. громадське партнерство «Нова освіта», 2013. – С. 176–180.
16. Вовк Л.П. Влияние геометрических характеристик неоднородной термоупругой пластинки на явление краевого резонанса / Л.П. Вовк, К.С. Кисіль, О.Б. Калашнікова // Прикладні задачі математики в механіці, економіці та екології, XI міжнар. студ. конф.: Зб. наук. праць. м. Севастополь, 15-19 квітня 2013 р. – Севастополь: СТМ, 2013. – С. 16–19.
17. Вовк Л.П. Зависимость явления краевого резонанса термоупругой области от некоторых физических характеристик области / Л.П. Вовк, К.С. Кисіль, О.Б. Калашнікова // Сб. науч. тр. SWorld. –Т. 3, вып. 3. – Иваново: МАРКОВА АД, 2013. – С. 35–38.

18. Кисіль К.С. Анализ распределения энергии в особых областях прямоугольного сечения для разных форм колебаний / К.С. Кисіль, И.С. Граков // Сб. науч. тр. SWorld. – Т. 3, вып. 3. – Иваново: МАРКОВА АД, 2013. – С. 99–103.
19. Кисель Е.С. Анализ влияния температурного фактора на локальную концентрацию напряжений в термоупругом слое / Е.С. Кисель, М.А. Абаза // Математическая культура инженера: Мат. студ. науч.-техн. конф., г. Донецк, 16 апреля, 2013 г. – Донецк: ДонНТУ, 2013. – С. 39–42.
20. Вовк Л.П. Локальная концентрация напряжений в особых точках неоднородной термоупругой области / Л.П. Вовк, Е.С. Кисель, В.А. Матвеев // Сб. науч. тр. SWorld. – Т. 4, вып. 4. – Иваново: МАРКОВА АД, 2013. – С. 43–46.
21. Вовк Л.П. Решение краевых задач для термоупругих однородных областей с негладкой границей / Л.П. Вовк, К.С. Кисіль, О.Б. Калашнікова // European Applied Sciences: modern approaches in scientific researches, 7th International Scientific Conference: Papers of the 7th International Scientific Conference, Stuttgart, Germany, December 16, 2013. – Stuttgart, Germany: ORT Publishing, 2013 – P.22–25.
22. Кисель Е.С. Исследование явления краевого резонанса конечной неоднородной термоупругой области / Е.С. Кисель, О.Б. Калашникова // Теоретические и практические проблемы развития науки: Сб. матер. III междунар. науч.-практ. конф., г. Махачкала, 30 ноября, 2013 г. – Махачкала: ООО «Апробация», 2013. – С. 25–28.
23. Кисель Е.С. Зависимость собственных частот термоупругой области от коэффициента температурного расширения и модуля сдвига / Е.С. Кисель, О.Б. Калашникова // Научная дискуссия: вопросы математики, физики, химии, биологии: Сб. статей по матер. XIII междунар. заоч. науч.-практ. конф. – № 1 (13). – М.: Изд-во «Междунар. центр науки и образования», 2014. – С. 50–55.
24. Кисель Е.С. Численный анализ характеристик волнового поля в задачах диагностики неоднородных термоупругих деталей / Е.С. Кисель // Вісті Автомоб.-дор. ін-ту. – 2014. – № 2 (17) – С. 47–57.
25. Вовк Л.П. Численный анализ зависимости параметров локальной особенности от термоупругих параметров среды / Л.П. Вовк, Е.С. Кисель // Научная дискуссия: вопросы математики, физики, химии, биологии: Сб. статей по матер. XVI междунар. заоч. науч.-практ. конф. – №4 (16) – М.: Изд-во «Междунар. центр науки и образования», 2014. – С. 89–96.
26. Вовк Л.П. Исследование явления краевого резонанса в неоднородной термоупругом сечении [Электронный ресурс] / Л.П. Вовк, Е.С. Кисель // Современные тенденции развития и перспективы внедрения инновационных технологий в машиностроении, образовании и экономике: Матер. II Междунар. науч.-практ. конф., г. Азов, 19 мая 2015 г. – Ростов н/Д: ДГТУ, 2015. – С. 256. – URL: <http://atidstu.ru/atidgtu-rf/node/1163>.
27. Вовк Л.П. Обзор основных методов решения краевых задач термоупругости / Л.П. Вовк, Е.С. Кисель // Перспективы развития научных исследований в 21 веке: Сб. матер. IX междунар. науч.-практ. конф.,

- г. Махачкала, 31 октября, 2015 г. – Махачкала: ООО «Апробация», 2015. – С. 8–9.
28. Кисель Е.С. Обзор основных методов решения краевых задач термоупругости / Е.С. Кисель, Е.А. Новицкая // Молодёжный форум: технические и математические науки: Тр. Междунар. науч.-практ. конф., г. Воронеж, 9-12 ноября 2015 года. – Воронеж: ВГЛУ, 2015. – С. 45–48.
29. Кисель Е.С. Обзор основных методов решения краевых задач термоупругости / Е.С. Кисель, А.С. Столярова // Молодёжный форум: технические и математические науки: Тр. Междунар. науч.-практ. конф., г. Воронеж, 9-12 ноября 2015 года. – Воронеж: ВГЛУ, 2015. – С. 52–55.
30. Вовк Л.П. Исследование влияния коэффициента температурного расширения на собственные частоты кусочно-неоднородных сечений деталей машин / Л.П. Вовк, Е.С. Кисель // Инновационные перспективы Донбасса: Сб. матер. междунар. науч.-практ. конф., г. Донецк, 20-22 мая, 2015 г. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – С. 6–10.
31. Вовк Л.П. Особенности динамического прочностного расчета анизотропных термоупругих областей / Л. П. Вовк, Е. С. Кисель // Современные проблемы механики сплошной среды: Тезисы докл. XVIII междунар. конф., г. Ростов-на Дону, 13 октября 2015 г. – Ростов-н/Д: Изд-во ЮФУ, 2015. – С. 44.
32. Вовк Л.П. Распределение энергии деформации по площади термоупругого неоднородного сечения детали на резонансных частотах / Л.П. Вовк, Е.С. Кисель // Вести Автомоб.-дор. ин-та ДонНТУ. - 2016. - № 1 (18). - С. 46–54.
33. Вовк Л.П. Особенности динамического прочностного расчета деталей сложной конфигурации / Л.П. Вовк, Е.С. Кисель // Вести Автомоб.-дор. ин-та ДонНТУ. - 2016. - № 2 (2). – С. 12–18.
34. Вовк Л.П. Перспективные задачи исследований термоупругих эффектов в кусочно-неоднородных телах с нерегулярной границей / Л.П. Вовк, Е.С. Кисель, Е.А. Новицкая. // Научный взгляд в будущее. – 2016. – Т. 7, № 1 (1). – С. 198–200.
35. Вовк Л.П. Особенности динамического прочностного расчета автомобильных деталей сложной конфигурации / Л.П. Вовк, Е.С. Кисель // Проблемы развития транспортной отрасли: Сб. тезисов докл. I республ. науч.-практ. конф., г. Горловка, 16 июня 2016 г. / отв. ред. А. В. Толлок / Автомобильно-дорожный институт ГОУВПО «ДонНТУ». – Горловка: АДИ ДонНТУ, 2016. – С. 21–28.
36. Вовк Л.П. Динамический прочностный расчет деталей сложной конфигурации в программном комплексе ANSYS / Л.П. Вовк, Е.С. Кисель // Современные проблемы развития транспортно-промышленного комплекса: технологии, экономико-управленческие инфраструктурные аспекты. Образовательные технологии в подготовке специалистов для транспортно-промышленного комплекса: Тр. XIII Междунар. науч. науч.-практ. республ. конф., 24-25 ноября 2016, г. Донецк. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – С. 83–88.
37. Вовк Л.П. Исследование спектров собственных частот тонких изотропных и анизотропных тел / Л.П. Вовк, Е.С. Кисель // Науч.-техн. аспекты развития автотранспортного комплекса: Сб. матер. III Междунар. науч.-практ. конф. в

рамках 3-го междунар. науч. форума ДНР «Инновационные перспективы Донбасса: Инфраструктурное и социально-экономическое развитие», 2017. - Донецк: ДонНТУ, 2017. – С. 27–32.

38. Вовк Л.П. Использование средств термоупругого анализа программы ANSYS в исследовании спектров собственных частот для тонких изотропных и анизотропных тел / Л.П. Вовк, Е.С. Кисель // Вести Автомоб.-дор. ин-та ДонНТУ. - 2017. - № 3 (22). – С. 3–9.

АННОТАЦИЯ

Кисель Е.С. Динамические задачи термоупругости для кусочно-неоднородных тел с негладкой границей.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела» – Автомобильно-дорожный институт Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет» Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики, г. Горловка, 2018.

Работа посвящена обобщению теории и совершенствованию методов решения связанных задач динамической термоупругости для тел кусочно-неоднородной внутренней структуры. Рассмотрены актуальные вопросы, связанные с разработкой численно-аналитических методов решения краевых задач, определяющих термомеханические характеристики волнового поля тел составного сечения. На основе полученных решений проанализированы особенности проявления тонких динамических эффектов, связанных с локальной концентрацией динамических напряжений на границе раздела изотропных сред с различными термоупругими свойствами.

В том числе, согласно сформулированному в работе общему подходу к решению динамических задач термоупругости для неоднородных областей дано комплексное исследование большинства динамических характеристик НДС с учётом температурных воздействий на характеристики волнового поля. Разработан достаточно универсальный алгоритм решения сформулированных в работе задач, который может быть применён для расчета волновых полей при различных силовых и температурных граничных условиях и наличии неоднородности внутренней структуры исследуемых объектов. Изучены эффекты локализации волновых движений для однородных и неоднородных термоупругих областей, интенсивность возникающей при этом концентрации напряжений определяется введенными критериями – ПЛЮ по напряжениям и температуре, значения которых определяются упругими и температурными характеристиками областей составного сечения. Найдены определяющие уравнения для расчета значений этих параметров для случаев сопряжения двух различных термоупругих областей. Полученные решения задач термоупругих неоднородных тел конечных размеров позволяют выявить основные закономерности динамического деформирования в различных компонентах исследуемых конструкций. На основе предложенных методов исследования могут быть выявлены дополнительные факторы, влияющие на

рассматриваемые вопросы прочностных расчетов динамического НДС элементов конструкций.

Ключевые слова: метод суперпозиции, термоупругость, напряженно-деформированное состояние, неоднородное сечение, волновые эффекты, краевой резонанс, граничный резонанс, собственные частоты, локальная концентрация напряжений, сингулярность.

ANNOTATION

Kisel E.S. Dynamic Problems of the Thermoelasticity for Sectionally Heterogeneous Bodies with Rough Boundary.

Dissertation for scientific degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences in specialty 01.02.04 «Mechanics of Deformable Solid Body» – Automobile and Highway Institute of State Higher Educational Establishment «Donetsk National Technical University», the Ministry of Education and Science of the DPR, Horlivka, 2018.

The work is devoted to the generalization of the theory and improvement of methods to solve related problems of dynamic thermoelasticity for bodies with sectionally heterogeneous internal structure. Actual issues, connected with the development of numerical and analytical methods to solve boundary value problems defining thermomechanical characteristics of the wave field of bodies with composite section, are considered. Based on the solutions obtained, features of subtle dynamic effects, related to the local concentration of dynamic stresses on the interface of isotropic media with various thermoelastic properties, are analyzed.

According to the general approach to the solution of dynamic problems of the thermoelasticity for heterogeneous areas formulated in this work, comprehensive study of the most dynamic characteristics of the deflected mode taking into account thermal effects on the wave field characteristics is given. The universal algorithm for solving the problems formulated in the work is developed. It can be used to calculate the wave fields under various force and temperature boundary conditions and at the heterogeneity of the internal structure of the objects under investigation. The effects of the wave motion localization for homogeneous and heterogeneous thermoelastic areas are studied; the intensity of resulting stress concentration is determined by introduced criteria which values are determined by elastic and thermal characteristics of areas with composite section. Determining equations to calculate values of these parameters for cases of interfacing two different thermoelastic areas are found. The solutions obtained for problems of thermoelastic heterogeneous bodies of finite sizes allow to identify main patterns of dynamic deformation in various components of investigated structures. Based on the proposed research methods, additional factors, influencing the considered issues of the deflected mode strength calculations of structural elements, can be identified.

Key words: superposition method, thermoelasticity, deflected mode, heterogeneous section, wave effects, edge resonance, boundary resonance, natural frequencies, local concentration of stresses, singularity.