

На правах рукописи

ВОВК ЛЕОНИД ПЕТРОВИЧ

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА
ДЕТАЛЕЙ МАШИН ИЗ НЕОДНОРОДНЫХ И АНИЗОТРОПНЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 01.02.04. – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

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

Ростов-на-Дону

2004

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования в Донском государственном техническом университете

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Соболь Б.В.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор **Ватульян А.О.;**

доктор технических наук, профессор
Пеньков В.Б.;

доктор технических наук, профессор
Ильин В.А.

Ведущая организация: **Институт проблем
механики РАН, г. Москва**

Защита состоится **27 октября 2004 г.** в 10 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.058.03 в Донском государственном техническом университете (ДГТУ) по адресу: 344010, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, ауд. 252.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ДГТУ

Автореферат разослан «____» _____ 2004 года

Ученый секретарь
диссертационного Совета
кандидат физ.-мат. наук,
доцент

Соловьев А.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Мировое сообщество вплотную приступает к решению важной задачи будущего – создания систем управления эксплуатацией деталей и конструкций, когда можно в любой момент времени знать состояние исследуемого технического объекта и предугадать изменение его прочностных характеристик в будущем. Для адекватного моделирования сложных структур и условий эксплуатации конструкций новой техники их расчетные схемы нуждаются в представлении уточненными математическими моделями с параллельной разработкой их численно-аналитического исследования. Бурное развитие методов динамической теории упругости привело к созданию ряда программных комплексов, позволяющих проводить расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов машин и конструкций сложной формы. Это создает условия для разработки новых эффективных методов проектирования и контроля качества материалов и позволяет совершенно по-новому взглянуть на одну из важнейших проблем техники – обеспечения безопасности эксплуатации механизмов и конструкций. Однако используемые в инженерной практике методики расчетов НДС деталей носят приближенный характер и зачастую основываются на необоснованных гипотезах, не учитывающих природу внутренней структуры деталей. Вместе с тем, природная, конструкционная и деформационная анизотропия и неоднородность физико-механических свойств присущи в определенной мере большинству материалов. Учет анизотропии и неоднородности при исследовании динамических процессов деформирования обуславливает более адекватные представления о качественном характере НДС упругих тел, позволяет получить более достоверные количественные оценки.

Интересом к разработке достоверной методики динамических расчетов деталей новой техники, в расчетах на прочность которых, необходимо учитывать как природу неоднородности (прерывность механических характеристик, анизотропию или технологическую неоднородность материала), так и специфику их контактного или вибрационного нагружения, определяется актуальность темы диссертации. Тема работы приобретает важную практическую ценность в связи с постоянно расширяющимся применением в

различных отраслях промышленности и строительства конструкционных элементов из существенно неоднородных анизотропных материалов. Во многих случаях это подвергающиеся высокочастотным вибрациям ответственные и дорогостоящие детали несущих конструкций, к которым предъявляются повышенные требования надежности и экономичности.

Вопрос повышения надежности деталей составного сечения является актуальной задачей, требующей постоянных изысканий в совершенствовании технологических и конструкторских решений. Известно, что упругие составные детали имеют следующие преимущества: поэлементное изготовление составных частей детали, возможность применения различных сочетаний материалов для них, снижение массы (металлоемкости) всей детали, ремонт (восстановление) элементов деталей составных изделий. При этом по своим прочностным и тепловым качествам многие неоднородные и композиционные материалы превосходят любой из своих компонентов или резко отличаются от него. Необходимо иметь в виду, однако, что наряду со многими технически важными преимуществами такие материалы обладают и существенным недостатком, который связан с тем, что физико-механические и химические свойства компонентов материала, зачастую, оказываются совершенно несогласованными, а это приводит к специфическим видам разрушения (расслоение, местные разрывы, нарушение адгезии и т.п.).

В машиностроении практически повсеместно отработана практика упрочнения внешней поверхности детали различными методами (цементация, нитроцементация, гальванизация, закалка). В связи с этим область внешней поверхности детали по механическим свойствам отличается от сердцевины. Естественно, при деформировании таких технологически неоднородных по структуре деталей возникают локальные динамические эффекты, которые приводят к концентрации напряжений (КН) в проблемных зонах сечения детали и которые техническими средствами диагностировать сложно.

До настоящего времени перечисленные выше проблемы не получили завершеного решения. При создании математической теории расчетов указанные особенности порождают большие трудности, которые остаются еще не преодоленными, а имеющиеся отдельные решения не удовлетворяют в полной мере инженерную практику.

Сказанное выше свидетельствует о том, что разработка научно обоснованной методики динамических расчетов на прочность различного рода неоднородных деталей сложной внутренней структуры, работающих в вибрационном поле на режимах, близких к резонансным, с учетом тонких динамических эффектов, является актуальной задачей, имеющей важное научное и практическое значение.

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка и научное обоснование математической, численной и экспериментальной методики исследования особенностей динамического НДС неоднородных деталей, находящихся в вибрационном поле, с учетом неоднородности и анизотропии их внутренней структуры.

Объектом исследования приняты неоднородные детали машиностроения, сложность внутренней структуры сечений которых обусловлена либо анизотропией сечения, либо его кусочной неоднородностью с ярко выраженными нерегулярными точками границы на стыке разнородных областей, либо технологической неоднородностью приповерхностных слоев детали, возникающей из-за упрочнения боковой поверхности с использованием высококонцентрированных источников энергии.

Предметом исследования являлись динамические прочностные характеристики в общем случае анизотропных призматических деталей с кусочно-неоднородным прямоугольным сечением и технологически неоднородных деталей цилиндрической формы при вибрационных и контактных нагружениях их боковой поверхности.

Методы исследования, принятые в работе, составляют комплекс численно-аналитических методов динамической теории упругости, численного моделирования контактного нагружения и НДС, статистические методы обработки численных и экспериментальных данных, экспериментальные методы механики деформируемого твердого тела.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в работе, обеспечивается непротиворечивостью результатов, полученных аналитически, численно и экспериментально, корректным использованием математических методов, проверкой их сходимости, а также сопоставлением различных частных случаев с полученными

ранее другими авторами. В каждом разделе работы определенное место отводится сравнению полученных результатов с результатами расчетов по конечно-элементной методике. Проведено исследование сходимости численных решений в зависимости от степени дискретизации пространственных и плоских областей исследуемых деталей.

На защиту выносятся:

1. Универсальный модифицированный численно-аналитический метод суперпозиции для исследования всех особенностей волнового поля в деталях с кусочно-неоднородным и анизотропным составным сечением.

2. Новый обобщенный критерий прочности составных тел – параметр локальной особенности (ПЛО) по напряжениям, который характеризует интенсивность локальной КН на границе раздела разнородных сред и в окрестности сингулярных точек границы составного сечения. В отличие от известных критериев данный параметр может быть принят во внимание и при сопряжении трех или четырех разнородных сред.

3. Комплекс выводов и рекомендаций по влиянию анизотропии, упругих и геометрических параметров сечения на характеристики волнового поля, в том числе, и на тонкие динамические эффекты граничного и краевого резонансов.

4. Обобщение метода ударного вдавливания индентора для определения комплекса механических характеристик технологически неоднородных деталей.

5. Распространение акустического метода собственных частот для определения дефектов в приповерхностных слоях неоднородных деталей машиностроения с целью их поточного экспресс-анализа.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые на единой научно-методологической основе, базирующейся на общих принципах динамической теории упругости, созданы эффективные численно-аналитические методы анализа динамической прочности неоднородных деталей машиностроения сложной внутренней структуры при их контактном и вибрационном нагружении, что позволило решить комплекс сложных проблем, связанных с тонкими динамическими эффектами, возникающими в проблемных зонах сечения деталей.

2. Автором впервые представлены теоретические и численные результаты анализа влияния мер анизотропии и несимметрии на волновые характеристики и природу краевых эффектов в деталях с составными сечениями различной конфигурации.

3. Впервые предложены и теоретически обоснованы понятия ПЛО по напряжениям, с помощью которых возможно систематизировать новые особенности КН на границах раздела разнородных сред.

4. Впервые с помощью обобщения метода суперпозиции создана математическая расчетная схема решения пространственной динамической задачи для полых цилиндрических деталей при их динамическом контактном виброн нагружении. Схема адекватно отвечает конструктивным и техническим особенностям сложных объектов техники, подвергающихся динамической контактной нагрузке.

5. Впервые предложена и конструктивно проработана численно-экспериментальная методика определения комплекса механических характеристик неоднородных деталей, основанная на методе ударного вдавливания индентора с последующей конечно-элементной обработкой полученных данных. С помощью этой методики определены характеристики динамического НДС в поршневых пальцах (ПП) ДВС. Это позволило существенно уточнить существующие приближенные схемы расчета и учесть реальную технологическую неоднородность механических свойств материала ПП.

6. Впервые приведены результаты компьютерного моделирования контроля качества приповерхностных слоев ПП, основанные на обобщении метода собственных частот на неоднородные объекты.

Практическая значимость работы заключается в создании прикладных математических моделей динамического вибрационного и контактного деформирования упругих неоднородных деталей машиностроения сложной внутренней структуры, которые позволяют повысить эффективность проектно-конструкторских работ при создании новых деталей и модернизации известных. Кроме этого, отдельные теоретические результаты являются определенным вкладом в общую теорию динамической теории упругости неоднородных сред. Установлены параметры, определяющие характер КН в проблемных зонах сечения неоднородных деталей, что позволит

на этапе проектирования оптимально подобрать упругие свойства стыкуемых материалов, составляющих сечение. Результаты экспериментальных исследований комплекса механических характеристик неоднородных деталей, приведенные в работе, представляют практический интерес при создании новых и модернизации известных устройств и механизмов, поскольку позволяют уточнить представление о характере контактирования их составных частей. В частности, появляется возможность создавать экономичные и научно обоснованные информационно-экспертные системы экспресс-контроля и производить статистический контроль качества продукции с учетом априорной информации о распределении ее механических свойств.

Реализация результатов. Отдельные теоретические и прикладные результаты диссертационной работы в виде методик и технических средств для их осуществления использованы и внедрены в практику проектирования на ряде предприятий России и Украины: ЗАО «Финскор» (г. Выборг), Стирол, Донецкий авторемонтный завод, АОЗТ Горловский авторемонтный завод, а также используются в учебном процессе при обучении студентов в Донском государственном техническом университете, Ростовском государственном строительном университете, автодорожном институте Донецкого национального технического университета. Под руководством автора его ученицей Е.В. Лупаренко подготовлена и успешно защищена в Донском государственном техническом университете кандидатская диссертация по теме «Исследование динамических эффектов в структурно-неоднородных анизотропных телах прямоугольного сечения».

Апробация работы. Результаты по теме диссертации получены в ходе выполнения двух хоздоговорных и трех госбюджетных инновационных работ (1984 – 2004гг.). Основные результаты работы обсуждались и получили положительную оценку на научно-технических семинарах Института проблем механики РАН, Донского государственного технического университета (1997÷2004гг.), Ростовского государственного строительного университета, Донецкого национального технического университета, на IV-й Международной научно-технической конференции «Динамика технологических систем», Ростов-на-Дону, ДГТУ, 2001г.; V-й, VII-й, VIII-й, IX-й, X-й Международных научных конференциях им. акад. Н. Кравчука в Киевском политехническом институте (1996, 1998, 2000, 2002, 2004гг.); V-й Крымской Международной математической школе «Метод

функций Ляпунова и его приложения», Алушта, 2000г.; Международных научно-технических конференциях «Износостойкость и надежность узлов трения машин», Хмельницкий, Транспортный университет Подолья, 2000, 2001гг.; Международной конференции «Проблемы надежности машин и конструкций», Минск, 2002г.; Всеукраинских научных конференциях «Математические проблемы технической механики», Днепропетровск (2001÷2004гг.); IV-й Международной научно-технической конференции «Вибрации в технике и технологиях», Винница, 2002г.; научных конференциях профессорско-преподавательского состава и студентов Украинского транспортного университета, Киев, УТУ, 2000, 2001гг.; Международной научно-практической конференции «Строительство-2003» Ростов-на-Дону, РГСУ, 2003г.; IV-м Всероссийском симпозиуме по прикладной и промышленной математике, Москва, 2003г.; VII-й Международной научно-практической конференции «Наука и образование – 2004», Днепропетровск.

Публикации. По результатам исследований, проведенных в диссертационной работе, опубликовано 60 научных работ, из которых 2 – монографии, 39 – статьи, опубликованные в научных сборниках и журналах, 19– докладов на конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести разделов, выводов, списка использованных источников и двух приложений. Полный объем работы составляет 346с., в которых основной текст – 314с., список использованных литературных источников – 32с.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность проблемы, основные научные положения и результаты, выносимые на защиту, а также степень их апробации.

В **первом разделе** дается анализ состояния проблемы развития теории и совершенствования методов анализа прочностных характеристик деталей сложной внутренней структуры.

Фундаментальный вклад в развитие численно-аналитических и экспериментальных методов исследования динамических задач неоднородных анизотропных сред внесли ученые В.П. Алехин, С.А. Амбарцумян, О.К. Аксентян, В.М. Александров, А.Я. Александров, А.Е. Андрейкив, В.А. Бабешко, В.М. Бабич, М.К. Балакирев, А.В. Белоконь, В.Л. Бердичевский, А.Н. Бескопильный, В.В. Болотин, Л.М. Бреховских,

М.Е. Богущ, С.И. Булычев, А.О. Ватульян, Ф.Ф. Витман, И.И. Ворович, Л.А. Галин, И.П. Гетман, Е.В. Глушков, Н.В. Глушкова, Д.Б.Гогоберидзе, Н.С. Городецкая, В.Т. Гринченко, Э.И. Григолюк, А.Н. Гузь, Н.Н.Давиденков, А.Ю. Ишлинский, В.В. Калинин, В.Л. Карлаш, Е.В. Коваленко, А.С. Космодамианский, Б.А. Кудрявцев, С.Г. Лехницкий, В.А. Ломакин, В.В. Мелешко, В.З. Партон, В.Б. Пеньков, П.И. Перлин, Г.Я. Попов, О.Д. Пряхина, М.Г. Селезнев, Б.И. Сметанин, Б.В. Соболев, А.Н. Соловьев, В.И. Сторожев, А.Ф. Улитко, Ю.А. Устинов, В.Н. Хромов, Г.П. Черепанов, К.Ф. Черных, Н.А. Шульга, Ле Хань Чай, А.П. Федорков, Д.И. Шерман, И.Я. Штаерман, Achennbach J.D., Benthem J.P., Bogu D.B., Dundurs J., Eer Nisse E.P., Gazis J.D., Holland R., Kagawa Y., Lloyd P., McNiven H.D., Mindlin R.D., Onoe M., Pao Y.H., Redwood M., Torvic P.J., Yamabushi T., Williams M.L. и др.

Представленный обзор научной периодики по аналитическим и численным методам анализа динамической прочности неоднородных деталей, находящихся в вибрационном поле, показал, что вопросы локальной КН и тонких динамических эффектов, связанных с усложнением внутренней структуры деталей, рассмотрены недостаточно полно. Наиболее эффективным и используемым методом для построения расчетных алгоритмов и создания программного обеспечения является МКЭ. Вместе с тем, непосредственное использование численных подходов в ряде задач механики связано с определенными проблемами. К этим задачам относятся задачи контактного взаимодействия, оптимизационно-прочностного проектирования и другие, требующие использования целого комплекса аналитических, асимптотических или экспериментальных методов.

Сравнительный анализ подходов и методов решения этих задач указывает на то, что существующие алгоритмы прикладных контактных задач не являются достаточно адекватными и универсальными. Требуют дальнейшего изучения проблемы учета трения и проскальзывания в контактирующей зоне, достоверного описания процессов нелинейного деформирования материалов. В недостаточной степени решены проблемы, связанные с разработкой и созданием эффективных методов решения контактных задач в трехмерной постановке с учетом сложной геометрической конфигурации взаимодействующих тел, сил трения в зонах взаимодействия, изменения механических характеристик металла

приповерхностных контактирующих слоев технологически неоднородных деталей.

Изучение вопросов влияния локальной КН на прочностные характеристики неоднородных деталей позволило выделить круг задач, требующих дальнейшего изучения: задачи о динамическом деформировании составных деталей и влиянии на него частотного параметра (большинство исследований относится к статическим задачам); задачи, связанные с анализом сложного НДС, возникающего на стыке трех и четырех разнородных сред (в литературе все авторы ограничивались рассмотрением только случая стыка двух упругих сред) и введения для таких случаев сопряжения комплексного понятия ПЛО и др. Эти проблемы возникают во многих прикладных задачах, где сопряжение материалов существенно влияет на прочность всей составной детали в целом, например, при проектировании стыковых сварных и паяных соединений, в том числе угловых. Поскольку расчет тонких динамических эффектов в инженерной практике затруднителен, то актуальным следует считать недостаточно изученный вопрос о зонах протяженности краевых и граничных динамических эффектов и их связи с геометрией составного сечения и частотным параметром, а также с мерами анизотропии.

Мало изученной следует считать задачу о влиянии меры анизотропии на краевые и граничные динамические эффекты при виброн нагружении деталей составного сечения. Практически полностью отсутствуют результаты анализа взаимосвязи мер анизотропии составных частей сечения с его геометрическими и структурными параметрами, а также не введены ПЛО для случая сопряжения анизотропных сред.

Недостаточно изученной следует считать важнейшую проблему современного машиностроения – вопрос прочности приповерхностных слоев материала деталей механизмов и их сопротивление разрушению в процессе эксплуатации. Прочность поверхностного слоя материала во многих случаях решающе влияет на прочность, долговечность и надежность не только отдельных узлов и деталей, но и машины в целом. Примером такой технологически неоднородной детали может служить ПП при работе ДВС. Расчет ПП проводится на основе необоснованных гипотез о линейности нагрузки на его боковой поверхности и, естественно, не учитывает тип технологической неоднородности его приповерхностных слоев. Между тем, особую роль приповерхностный слой играет именно в деталях пар трения. Сложные

процессы контактирования ПП с головкой шатуна и бобышками поршня с учетом технологической неоднородности материала ПП и их влияние на поле контактных напряжений не изучены и играют первостепенную роль в прочностном расчете ПП.

Второй раздел работы посвящен разработке модификации метода суперпозиции для исследования задач вибрационного нагружения деталей прямоугольного составного кусочно-неоднородного сечения и анализу на его основе особенностей волнового поля в опасных зонах сечения. Важная особенность геометрии рассматриваемых областей обусловлена наличием в них не только угловых точек, но и линий раздела сред с различными упругими характеристиками. Представляет большой практический интерес исследование особенностей волнового поля в окрестности этих линий раздела.

Общий алгоритм основного модифицированного метода суперпозиции изложен при решении задачи о вынужденных симметричных установившихся колебаниях бесконечной призматической детали, сечение которой содержит M прямоугольных, жестко соединенных между собой, областей. Каждая из областей $G^{(m)}$ занята своим однородным и изотропным упругим материалом с модулем сдвига $\mu^{(m)}$, коэффициентом Пуассона $\nu^{(m)}$ и плотностью $\rho^{(m)}$. Таким образом, в $1/4$ части сечения будут присутствовать M сингулярных точек A_m на стыке разнородных сред и угловая точка B .

Метод основан на знании явного вида и свойств нормальных мод бесконечных слоев, пересечение которых образует составное сечение детали. Общее решение $U_\beta^{(m)}$, удовлетворяющее системе уравнений движения внутри области $G^{(m)}$, конструируем в виде суммы двух частных решений этой системы, каждое из которых описывает симметричные колебания бесконечных полос, образующих при своем пересечении область $G^{(m)}$. Вводим в рассмотрение вспомогательную краевую задачу, которая характеризуется заданием на внешних и внутренних границах сечения нормальных перемещений и касательных напряжений. Это позволяет провести ее аналитическое решение. В правых частях новых граничных условий присутствуют неизвестные вспомогательные функции. Раскладываем эти (ЗМ-1) функций в ряды Фурье на соответствующих отрезках и, используя общее решение задачи, составляем неиспользованные граничные

условия исходной краевой задачи. Поскольку все компоненты волнового поля выражены через коэффициенты Фурье вспомогательных функций, то эти условия представляют собой систему интегральных уравнений (СИУ) для их определения.

Для построения эффективного алгоритма ее решения исследуем особенности волнового поля в окрестности нерегулярных точек A_m и B границы сечения, которые характеризуются ПЛО α_m и α_B . Исследование поведения полученной СИУ при подходе к нерегулярным точкам и ограниченность ее правых частей во всей области приводит, в конечном итоге, к характеристическим уравнениям для определения ПЛО α_m и α_B .

Анализ этих уравнений позволяет утверждать, что при построении асимптотики решения в окрестности точки B можно учитывать только вещественный корень $\alpha_B=1$. ПЛО α_m характеризующие характер разрывов волновых характеристик во внутренних угловых точках составной области, не зависят от частоты и геометрических параметров области и определяются только значениями упругих модулей стыкуемых областей. При определенных соотношениях механических свойств материалов стыкуемых областей будет существовать вещественный корень $0 < \alpha_m < 1$, что характеризует возникновение локальных особенностей НДС в точках A_m .

Применение для решения СИУ метода Бубнова-Галеркина с учетом в координатных функциях характера особенностей решения приводит к бесконечной системе алгебраических уравнений с известной асимптотикой неизвестных. Предлагаемый численно-аналитический метод решения позволяет построить простой алгоритм численного исследования резонансных частот (РЧ) и форм колебаний областей рассматриваемой геометрии и неоднородности. В его рамках возможно рассмотрение волновых полей как неоднородных многосвязных областей, так и задач о кинематическом возбуждении колебаний. Без принципиальных затруднений вместо условий жесткого сцепления областей можно рассмотреть другой характер сопряжения, например, условия гладкого контакта.

Численное исследование полученных математических моделей реализовано для случая $N=2$, что соответствует геометрии сечения, изображенного на рис.1.

Наибольший интерес при численном анализе вызывает то значение ПЛО $\alpha_A=\alpha$, которое отвечает наиболее сильной особенности НДС. Применяем обозначения металлов, используемые в таблице

химических элементов Д.И. Менделеева. Для стали примем обозначение **St**.

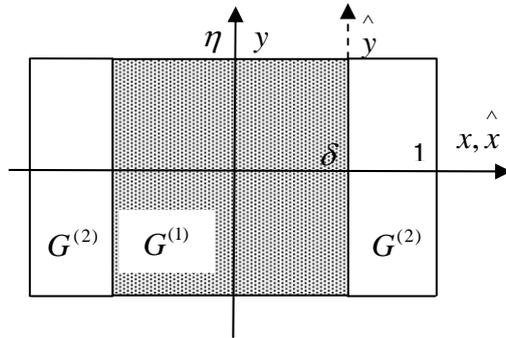


Рис. 1. Геометрия сечения

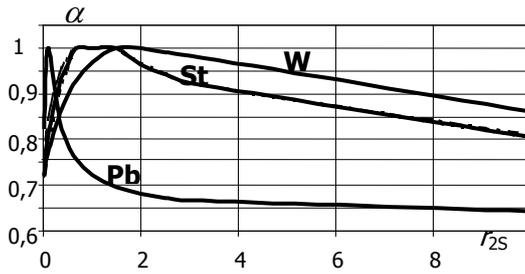


Рис. 2. Жесткостная зависимость ПЛО

При численном анализе были подсчитаны значения ПЛО α для большинства сочетаний известных материалов и выделены пары материалов-концентраторов напряжений. Проведен анализ влияния на значение ПЛО жесткостных параметров сечения.

На рис.2 представлены графики зависимости ПЛО от жесткостей стыкуемых сред для случая, когда материалом внутренней области принимались сталь, свинец и вольфрам. В качестве основных характеристик были выбраны упругие параметры наплавок r_{2s} , ν_{2s} , отнесенные к упругим модулям стали.

Исследовано и асимптотическое поведение ПЛО для случая, когда упругие модули стыкуемых сред сильно различаются. Это позволяет применить полученные результаты для анализа локальной концентрации напряжений при сопряжении металлов с клеевыми, керамическими и т.п. материалами. Например, когда модуль сдвига наплавок стремится к бесконечности, асимптотическое значение ПЛО α_0 определяется только значением коэффициента Пуассона $\nu^{(1)}$ и удовлетворяет уравнению

$$(\sin^2(\pi\alpha_0/2) - \alpha_0^2)(\alpha_0^2 + (3 - 4\nu^{(1)})\sin^2(\pi\alpha_0/2) - 4(1 - \nu^{(1)})^2) = 0.$$

Для всех реальных материалов корни второго множителя этого уравнения удовлетворяют неравенству $0 < \alpha_0 < 1$. Таким образом, при очень больших значениях модуля сдвига наплавок мы

имеем возможность изменением коэффициента Пуассона материала внутренней области, достичь максимально возможного значения ПЛО.

Проведен систематизированный анализ влияния, которое оказывают на явление краевого резонанса соотношения механических и геометрических параметров составного сечения. Это позволяет при анализе спектра безразмерных РЧ $\Omega_i^{(1)} = \omega a / c_s^{(1)}$ (a – общая ширина сечения, $c_s^{(1)}$ – скорость сдвиговых волн во внутренней области сечения) определить условия, при которых указанными краевыми эффектами можно пренебречь. В частности, если для данного сочетания материалов значение ПЛО меньше единицы (материалы-концентраторы), то при всех соотношениях упругих и геометрических параметров составного сечения проявления краевого резонанса отсутствуют. Для обычных пар материалов (значение ПЛО равно единице) признаки краевого резонанса присутствуют при малых размерах внешней области, постепенно исчезая с их увеличением. Особняком в анализе стоят сочетания материалов, на границе раздела которых возможно появление волн Стоунли. Для этих сочетаний значение ПЛО меньше единицы, но слабые признаки краевого резонанса присутствуют при малых размерах наплавов.

Иные выводы следует сделать при энергетическом анализе распределения динамической напряженности вблизи границы раздела разнородных областей сечения. Именно: чем меньше значение ПЛО для рассматриваемого сочетания материалов, тем большее значение внутренней энергии накапливается в окрестности границы раздела сред. Подобные результаты получены и при анализе динамических компонент тензора напряжений на разных частотах. Однако в этом случае говорить о том, что только значение ПЛО определяет локальную КН нельзя. Распределение динамических напряжений существенно зависит также и от волновых сопротивлений контактирующих сред.

Разработанный модифицированный метод суперпозиции позволяет провести численный анализ коэффициентов КН в окрестности внутренних сингулярных точек границы сечения. Для случая неоднородной прямоугольной области этот анализ проведен, очевидно, впервые. Определено наличие специальных частот (частот граничного резонанса), на которых для сочетаний материалов-концентраторов наблюдается довольно резкий скачок динамических коэффициентов КН. Отмечено, что этот скачок будет тем сильнее

выражен, чем меньше значение ПЛО для рассматриваемого сочетания материалов составного сечения. Определены границы изменения размеров областей сечения, при которых наблюдается наиболее интенсивная КН на границе раздела сред. Полученные результаты позволяют дать практические рекомендации для оптимального подбора геометрических и упругих параметров сечения с целью минимизации локальной КН в окрестности границы раздела сред.

Вычисление ПЛО по напряжениям α и построение спектра РЧ позволяет полностью изучить все качественные и количественные характеристики волнового поля в паяных соединениях (ПС). Ввиду большого различия в значениях упругих характеристик большинства основных материалов и припоев практически при любом их сочетании возникает локальная КН в окрестности паяного шва. Этот вывод подтверждается и при исследовании закономерностей изменения коэффициентов КН в ПС. Однако и здесь уже на этапе проектирования стыковых ПС имеется возможность оптимального подбора сочетания основного материала и припоя. Варьируя значения параметра жесткости, можно для каждого типа ПС подобрать упругие характеристики припоя таким образом, чтобы ПЛО оказался наибольшим. Это обеспечит минимум локальной КН и увеличит надежность и долговечность ПС.

Третий раздел посвящен изучению особенностей КН в окрестности границы раздела трех и четырех упругих сред. Особенностью таких сечений является наличие наряду с особыми точками границы сечения на стыке двух сред и внешней угловой точки также и сингулярной внутренней угловой точки D , расположенной на стыке трех (рис.3) или четырех (рис.4) сред.

Рассмотрены особенности применения метода суперпозиции для тел с рассматриваемой усложненной геометрией поперечного сечения. Формулировка вспомогательной задачи претерпевает значительные усложнения по сравнению со случаем кусочной неоднородности, рассмотренной в разделе 2. Это связано, во-первых, с необходимостью обеспечить аналитическое решение вспомогательной задачи и, во-вторых, с удовлетворением максимально возможного числа граничных условий исходной краевой задачи. Все эти трудности удалось преодолеть и сохранить основную структуру модифицированного метода суперпозиции.

Следует отметить также усложнение асимптотического анализа разрешающей СИУ. Дело в том, что вспомогательные функции,

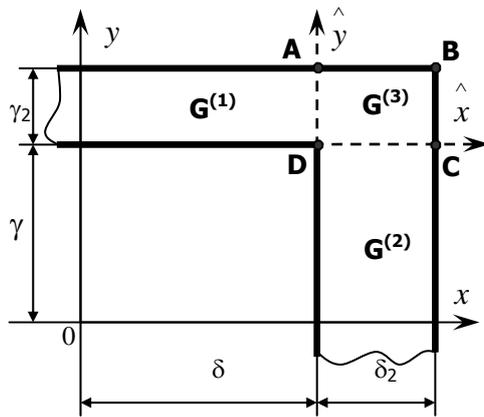


Рис. 3. Стык 3-х сред

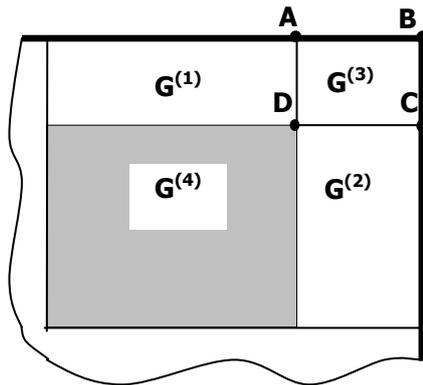


Рис. 4. Стык четырех сред

введенные на внутренних линиях раздела сред и представляющие собой значения перемещений и касательных напряжений на этих линиях, должны иметь различные особенности в окрестностях крайних точек своих областей определения. С точки зрения механики это означает наличие различных значений ПЛО во всех точках стыка разнородных сред. Именно наличие внутренних угловых точек вносит существенное усложнение и новизну при реализации асимптотического анализа СИУ. К тому же наличие четырех нерегулярных точек границы сечения существенно усложняет природу КН во всем сечении, поскольку при некоторых соотношениях геометрических параметров сечения, обеспечивающих близость нерегулярных точек друг к другу, может сказаться взаимное влияние

энергетического поля в окрестности этих точек.

На базе проведенного асимптотического анализа получены трансцендентные уравнения, определяющие значения ПЛО в сингулярных точках сечения. Изучены качественные отличия значений ПЛО во внутренней угловой точке на стыке трех и четырех сред от значений ПЛО на стыке двух сред.

Остановимся вначале на некоторых результатах, полученных при изучении особенностей НДС составного сечения, изображенного на рис.3. В частности, при численном анализе доказано, что при любых сочетаниях типов материалов на стыке трех сред (даже, если

они обладают одинаковыми упругими характеристиками, тогда ПЛО ($\alpha=0.544$) обязательно возникает локальная КН, причем для большинства сочетаний материалов именно характер НДС в окрестности внутренней угловой точки будет определяющим для всего сечения. Именно, здесь интенсивность КН будет больше, чем в тт. А и С. Этот факт давно известен конструкторам, однако при помощи предлагаемой методики возможно оценить степень динамической КН и использовать полученные результаты при проектировании деталей составного сечения с внутренней угловой точкой.

Детально исследованы закономерности изменения значения ПЛО в зависимости от соотношения жесткостей и коэффициентов Пуассона стыкуемых сред. Рассмотрены различные сочетания жесткостей пристыкованных и угловой области сечения. Для каждого сочетания типов материалов и расположения «жестких» и «мягких» областей составного сечения даны практические рекомендации для оптимального выбора сочетаний материалов. Большое значение имеют результаты асимптотического анализа уравнения, определяющего ПЛО, для случая, когда значения модулей сдвига сопрягаемых областей сильно различаются. Этот анализ дает возможность варьировать упругими характеристиками не одной области, а двумя, что позволяет существенно снизить стоимость детали.

Рассмотрены особенности спектра РЧ $\Omega_i^{(1)} = \Omega_i^{(1)}(L)$, $L = 1/\eta$ для случаев, когда материал либо угловой, либо пристыкованной области отличен от материала соседних областей сечения при различных соотношениях их жесткостей (рис.5).

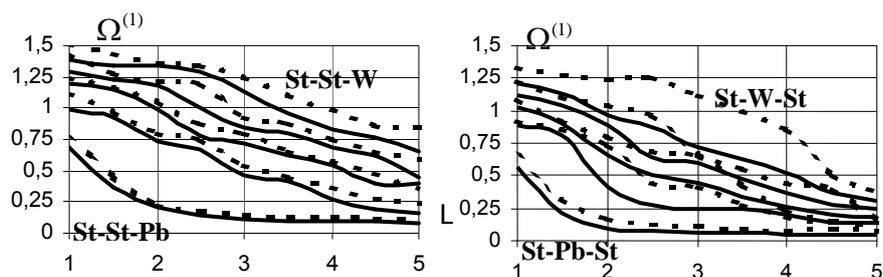


Рис.5. Спектр РЧ для случая стыка 3-х сред ($\delta=0.2$, $\gamma=0.2\eta$)

Отмечены возможности проявления тонких динамических эффектов при эксплуатации детали на соответствующих РЧ. В частности, чем больше жесткость материала угловой области, тем

сложнее картина спектра РЧ. Кроме того, на рис. 5 можно заметить участки спектральных кривых, на которых угадываются признаки краевого резонанса: одна из частот мало изменяется при изменении внешних геометрических размеров сечения. Следует, однако, отметить, что эта особенность выражена слабо. Спектр колебаний для сочетаний материалов, когда материал присоединенной области отличен от стали, носит гораздо более простой характер и особых участков практически не содержит.

Достоверность полученных результатов подтверждается сравнением полученных значений РЧ со значениями РЧ, рассчитанными по конечно-элементной методике.

При анализе компонент динамического НДС численно подтверждено определяющее влияние значений ПЛО на интенсивность локальной КН в опасных зонах сечения. Особо интересным следует признать установленный факт влияния частотного параметра на локализацию зоны максимальной напряженности в сечении. Именно, на некоторых РЧ максимальные значения характеристик НДС отмечены в окрестности внешней сингулярной точки сечения на стыке двух сред, а не в т. D, хотя значение ПЛО в этой точке существенно меньше для всех рассмотренных сочетаний материалов сечения. Установлена зависимость величины всплеска внутренней энергии, накопленной в окрестности линии раздела сред, от суммы значений ПЛО в граничных точках этой линии: чем меньше будет значение суммы ПЛО, тем сильнее будет КН на линии раздела.

На базе основного асимптотического алгоритма исследования динамического НДС получено определяющее уравнение для значения ПЛО в точке стыка четырех сред (рис. 4). При некоторых ограничениях на упругие характеристики областей сечения и введенные во вспомогательных задачах дополнительные функции уравнение для определения значения ПЛО в точке стыка четырех сред переходит в уравнение для определения значения ПЛО в точке стыка трех сред. Кроме того, достоверность полученного определяющего уравнения подтверждается его инвариантностью при круговой перестановке упругих характеристик стыкуемых сред и при взаимной замене местами накрест лежащих областей сечения.

На основе детального исследования трансцендентного уравнения для определения значения ПЛО в точке стыка четырех сред сформулированы общие закономерности его изменения в зависимости от соотношения упругих модулей стыкуемых областей сечения.

Следует отметить значительные трудности классификации получаемых результатов, связанные с многопараметричностью задачи. Для каждого рассмотренного случая соотношений упругих параметров стыкуемых сред даны рекомендации для проектирования составного сечения с целью минимизации интенсивности КН. Некоторые основные выводы следующие: для большинства сочетаний материалов КН в окрестности т. D возникает, однако ее интенсивность гораздо меньше, чем при сопряжении трех сред (рис. 3); при сопряжении 4-х одинаковых областей ПЛО $\alpha=1$.

Проанализированы закономерности изменения спектра РЧ не только от внешних размеров области, но и от параметров, характеризующих размеры внутренней неоднородности. Представленные в работе результаты свидетельствуют, прежде всего, о качественном отличии анализируемых спектров для случаев одинаковых материалов накрест лежащих и соседних областей. При этом участки сингулярности на представленных спектрах РЧ достаточно отчетливо присутствуют только для первого типа следования материалов областей сечения. Для второго типа сочетаний материалов эти участки только угадываются на небольших интервалах изменения параметра внутренней неоднородности.

Основное внимание при численном анализе было уделено особенностям собственных форм колебаний, соответствующих участкам сингулярности на спектрах РЧ. Проанализированы отличия в поведении волновых характеристик в пристыкованных и угловой областях с точки зрения проявления граничных динамических эффектов, а также указаны значения жесткостных и геометрических параметров сечения, на которых эти эффекты выражены наиболее отчетливо. При анализе энергетической характеристики волнового поля отмечен всплеск энергии на некоторых РЧ вблизи внутренней границы раздела сред. Определяющее значение на величину этого всплеска оказывают значения ПЛО в сингулярных точках сечения на концах линии раздела. В то же время следует отметить нарушение на некоторых РЧ указанной взаимосвязи, если речь идет об энергии, накопленной не на всей линии раздела сред, а только в окрестностях особых точек. В этом случае минимальное значение ПЛО не гарантирует максимального накопления энергии в сингулярной точке. Этот факт был отмечен и ранее при исследовании внутренней энергии в нерегулярных точках для случая стыка трех сред.

Полученные в данном разделе результаты представляют не только теоретический интерес в математическом плане. С одной стороны, они позволяют проектировать составные элементы конструкций с усложненной кусочно-однородной внутренней структурой. На базе предлагаемого метода возможно решение задач исследования волновых процессов в деталях, кусочная неоднородность сечения которых отличается от рассмотренной в разделах 2 и 3, но представляет ее частные случаи. Для этого можно убирать, например, из сечения на рис.4 пристыкованную или угловую область и использовать определяющую СИУ при нулевых значениях соответствующих параметров и дополнительных функций вспомогательной задачи. Ограничения здесь связаны только с расположением сингулярных точек границы составного сечения, однако, проведенное исследование уже позволит рассматривать особые точки на стыке двух, трех и четырех разнородных упругих сред. Это следует считать вполне достаточным для выбора проектировщиком геометрических и упругих характеристик прямоугольного составного сечения. С другой стороны, отмеченные выше закономерности поведения характеристик НДС позволяют дать практические рекомендации по подбору упругих характеристик стыкуемых областей с целью минимизации возникающей в особых точках сечения локальной КН и уменьшения зоны проявления краевых и граничных динамических эффектов.

Четвертый раздел работы посвящен оценке влияния меры анизотропии на особенности волнового поля неоднородных деталей прямоугольного сечения.

Дано обобщение модифицированного метода суперпозиции для исследования волновых полей в призматических деталях анизотропных однородных, симметричных и несимметричных кусочно-однородных сечений прямоугольной формы. Отказ от гипотезы изотропии механических свойств материалов сечения приводит лишь к усложнению математических преобразований, но не затрагивает структуру основного метода, что свидетельствует о его достаточно большой универсальности. Только в случае несимметричного кусочно-однородного сечения в формулировку вспомогательной задачи пришлось внести некоторые изменения, однако, эти изменения связаны не с фактом анизотропии материалов составного сечения, а с изменением его геометрии. Асимптотический же анализ определяющих СИУ во всех, рассмотренных в данном разделе задачах,

практически повторяет аналогичные процедуры, реализованные в изотропном случае, а отличается от них лишь достаточно большим увеличением трудоемкости математических выкладок. Отметим, что данная модификация метода суперпозиции на анизотропные среды свободна от дополнительных гипотез, связанных с различными ограничениями на упругие постоянные.

В процессе реализации основной численно-аналитической методики сформулированы определяющие уравнения для нахождения ПЛО в сингулярных точках границы анизотропного сечения. Даже в случае однородного анизотропного прямоугольного сечения ПЛО во внешних угловых точках области уже зависит от упругих констант материала. При проверке достоверности получаемых уравнений было достигнуто совпадение значений ПЛО при стремлении мер анизотропии к нулю со значениям ПЛО, соответствующими изотропному материалу. Были проведены также сравнения значений РЧ со значениями, полученными при помощи МКЭ и со значениями частот, на которых существуют моды Ламе (для определенных размеров прямоугольного сечения).

При численном исследовании ПЛО во внутренних сингулярных точках составного сечения были рассмотрены различные случаи сочетаний анизотропных свойств материалов стыкуемых областей и рассмотрены закономерности изменения значения ПЛО в зависимости от мер анизотропии и жесткостных параметров сечения. В работе представлены данные расчетов значений ПЛО для случаев сопряжения множества конкретных материалов transversально изотропных и ортотропных сред с изотропными.

В первом случае установлена определяющая роль параметра жесткости r_{21} при вычислении ПЛО. Именно: чем ближе значение этого параметра к единице, тем большее значение принимает ПЛО.

Во втором случае увеличение числа независимых упругих постоянных в случае ортотропного материала одной из стыкуемых областей значительно уменьшает влияние параметра жесткости на значение ПЛО. Например, приведенные результаты показывают, что локальной КН при сопряжении стеклопластиков с изотропными материалами не возникает для большинства рассмотренных сочетаний материалов. Значение ПЛО, меньшее единицы, появляется только при очень больших значениях параметра жесткости. К тому же, это значение получается очень близким к единице.

Несколько иные результаты имеем при анализе сочетаний анизотропных акустических кристаллов с изотропными материалами. Здесь значение параметра r_{21} оказывает гораздо большее влияние на ПЛО. Однако это влияние не является определяющим. Все же, для данных сочетаний материалов можно считать доказанным: если значение r_{21} существенно отличается от единицы, то с его увеличением значение ПЛО уменьшается.

При численном анализе спектра РЧ основное внимание было уделено анализу влияния мер анизотропии на интенсивность краевых и граничных динамических эффектов. Установлено, что в случае однородного анизотропного прямоугольного сечения с увеличением мер анизотропии эффекты, характерные для краевого резонанса, несколько видоизменяются. Это выражается как в изменении частоты краевого резонанса, так и в некотором уменьшении интенсивности волновых движений вблизи внешней границы сечения. Варьируя значениями упругих постоянных, можно добиться минимального значения краевой РЧ. При сравнительно большом возмущении изотропии анизотропия существенно влияет на значения РЧ, причем характер зависимостей РЧ (в том числе и частоты краевого резонанса) от мер анизотропии становится близким к линейному.

Анализ спектра РЧ кусочно-однородного сечения, естественно, требует учета не только структурных, но и геометрических параметров составного сечения. На базе проведенного численного анализа сформулированы основные закономерности влияния мер анизотропии и размеров наплавов на спектр РЧ при различных типах анизотропии внутренней области сечения и наплавов (рис. 1).

В частности, отмечено усиление эффектов краевого резонанса при больших размерах анизотропных наплавов и изотропной внутренней области. На рис.6 приведены графики зависимости изменения РЧ от параметра L для различных показателей анизотропии E_2/E_1 внешней области при $\delta_2=6/7$. В качестве материала наплавов выбран материал с характеристиками алюминия, анизотропия характеризуется изменением модуля упругости E_2 вдоль оси Oy , а все остальные характеристики фиксированы. Материал изотропной внутренней области – сталь. Для верхнего рисунка принимается $E_2=1.5E_1$, для нижнего – $E_2=3E_1$. При малых значениях δ_2 меры анизотропии внешней области не оказывают влияния на характер спектра РЧ. Для случая анизотропной внутренней области и

изотропных наплавок признаки краевого резонанса наблюдаются лишь в случае малых размеров наплавки.

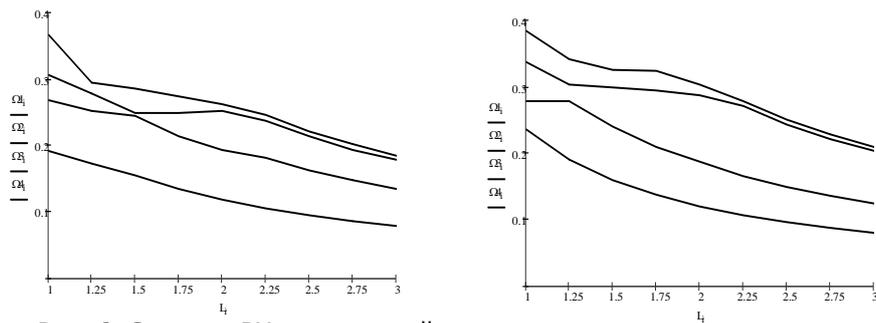


Рис. 6. Спектры РЧ для сечений с различными мерами анизотропии

Таким образом, используя полученные результаты, можно прогнозировать поведение волнового поля на краевых частотах и указать такие соотношения параметров анизотропного составного сечения, при которых возможно пренебречь анизотропией материала областей сечения.

Впервые изучены гармонические колебания кусочно-однородного составного анизотропного прямоугольного сечения несимметричной структуры, состоящего из двух состыкованных друг с другом разнородных прямоугольных областей различных размеров. Основной результат: несимметрия смазывает проявления краевого резонанса. Более ярко выражена связь значения ПЛО в точке сопряжения материалов с картиной спектра РЧ. Чем меньше значение ПЛО в указанной сингулярной точке, тем сильнее внутренняя энергия концентрируется на границе раздела материалов и тем менее ярко выражены признаки краевого резонанса. Сформулированы основные закономерности распределения внутренней энергии по сечению детали и картины спектра РЧ для различных типов сочетаний материалов стыкуемых областей, параметра несимметрии и мер анизотропии материалов стыкуемых областей. Это позволит управлять выбором конкретных типов материалов сечения и размерами стыкуемых областей для получения требуемых эксплуатационных характеристик.

В **пятом разделе** разработан численно-экспериментальный подход к оценке НДС деталей с технологической неоднородностью на примере ПП ДВС при динамическом нагружении.

Надежность таких деталей определяется не каким-либо одним, а комплексом механических характеристик, важнейшими из которых являются пределы текучести и прочности (σ_T и σ_V), относительное удлинение при разрыве δ_5 , ударная вязкость, трещиностойкость, твердость HV и другие. Корректное определение этого комплекса характеристик, как в технологически упрочненных приповерхностных слоях поверхности детали, так и на глубине, позволит прогнозировать ее ресурс и обеспечить безотказную работу агрегата в эксплуатации.

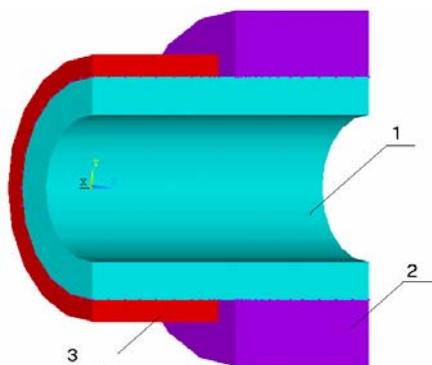


Рис. 7. Модель контактного взаимодействия (1 - ПП; 2 – бобышка поршня; 3 – головка шатуна)

Рассматривается задача о динамическом нагружении ПП для четырехтактных двигателей. На рис. 7 представлена модель $\frac{1}{4}$ части всего соединения. Во время работы ПП подвергаются воздействию переменных по величине и направлению динамических нагрузок, имеющих большей частью ударный характер.

Первоначальный контакт имеет место по линии вдоль образующей цилиндров, затем поверхность контакта увеличивается, а ее размеры подлежат определению. Сверху на бобышку поршня действует распределенная нагрузка,

интегральная величина которой P_{max} равна разности силы давления газов при сгорании и сил инерции.

Для определения комплекса механических характеристик поршневого пальца был выбран метод ударного вдавливания конического индентора с углом 90° в предварительно отшлифованную поверхность ПП с торца на различной глубине. В процессе испытаний экспериментально определяли перемещение, скорость и ускорение индентора специальным прибором и пересчитывали значения механических характеристик при помощи стандартной процедуры многомерного регрессионного анализа.

Экспериментальные исследования, проведенные на лабораторной установке ударника пружинного действия, показали,

что в широком диапазоне исследованных марок сталей, из которых изготавливаются ПП, существует тесная связь между комплексом характеристик ударного вдавливания и механическими свойствами. Неоднородность внутренней структуры материала ПП, связанная с технологической обработкой его внешней поверхности, существенно усложняет эту связь. Для ее корректного учета в прочностных расчетах требуется знать вид кривой деформирования в каждой точке. Восстановление этих кривых производится с помощью экспериментально определенных значений механических характеристик материала. Статистический анализ полученных эмпирических зависимостей по критериям Фишера и Стьюдента, а также высокие значения коэффициентов детерминации позволяют моделировать поведение материала с учетом геометрически и физически нелинейных свойств.

Наибольшее влияние на связь между механическими свойствами и характеристиками ударного вдавливания оказывают максимальные значения глубины, скорости и ускорения разгона индентора. Влияние максимального ускорения замедления и скорости отскока проявляется в меньшей степени из-за значительного рассеивания результатов.

Результаты испытаний представлены на рис. 8.

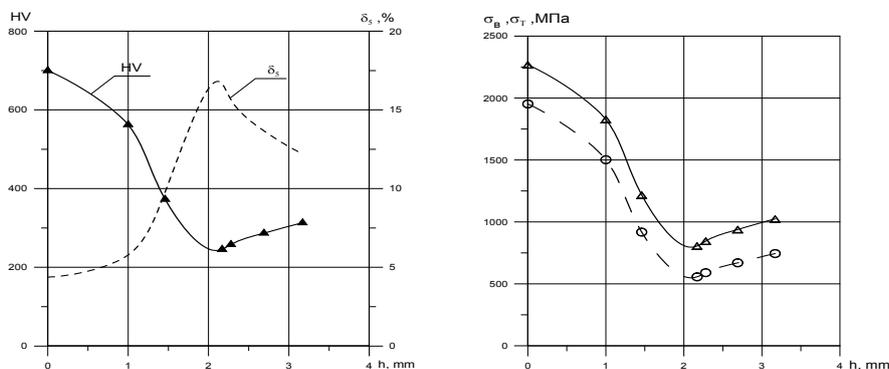


Рис. 8. Зависимости HV, δ_5 , σ_T и σ_B от глубины цементованного слоя

Как видно из графиков, поверхность ПП имеет самые высокие значения твердости HV, пределов текучести σ_T и прочности σ_B и самое низкое значение пластичности (относительное удлинение после

разрыва) δ_5 . Далее по мере роста глубины прочностные характеристики падают, а показатели пластичности растут. Такое изменение характеристик наблюдается до середины стенки ПП, то есть до глубины 2 мм.

Полученные результаты подтверждаются и данными микроструктурного анализа материала ПП. Были проведены металлографические исследования на микроскопе «Неофот – 21». Шлифы обрабатывали 4%-ным раствором HNO_3 в спирте. Твердость измеряли на приборе Роквелла по шкале С. В качестве исследуемого был выбран ПП, изготовленный из стали 45 и подвергнутый термическому улучшению (закалка + высокий отпуск) с последующей закалкой токами высокой частоты.

Фотография поперечного микрошлифа приведена на рис. 9. Из этой фотографии видно, что в поперечном сечении ПП выделяются три зоны. Условно обозначим их: *A* – соответствует слою толщиной примерно 2 мм, закаленному ТВЧ; *B* – переходная зона толщиной примерно 1 мм; *C* – соответствует основному материалу до закалки.

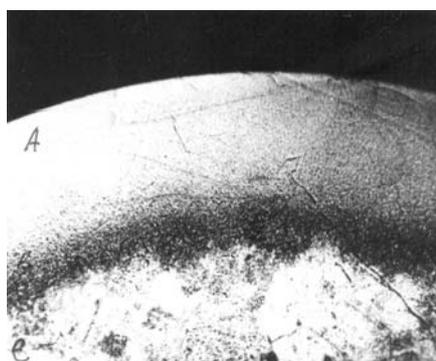


Рис.9. Поперечный микрошлиф

оценку его динамического НДС при помощи МКЭ в динамической постановке с учетом упругопластических свойств материала и неоднородности деталей. При этом с помощью разработанной методики расчета можно учесть и возникающую в точках контакта ПП с бобышками поршня и головкой шатуна КН.

Результаты решения динамической задачи представлены в виде полей напряжений, деформаций и перемещений деталей поршневой группы. Из их анализа следует, что в зоне контакта

Микроструктура в зоне *A* – мелкоигльчатый мартенсит. Твердость зоны составляет 55 – 56 HRC. Переходная зона *B* представляет собой мелкоигльчатый мартенсит и феррит. Твердость зоны соответственно 37 – 40 HRC. Твердость зоны *C* составляет 25 – 27 HRC.

Знание зависимости изменения механических характеристик ПП по глубине позволяют провести уточненную

бобышки поршня с ПП возникает КН, обусловленная влиянием граничных эффектов. Поля напряжений имеют характерный пик в окрестности особой точки и ниспадающий характер на удалении. Похожая картина возникает в зоне контакта ПП с головкой шатуна.

Следует отметить, что кроме сжимающих напряжений, обусловленных контактным взаимодействием, возникают значительные растягивающие напряжения, обусловленные изгибом, и приводящие к овализации пальца. Попеременное воздействие этих напряжений приводит к появлению усталостных трещин и разрушению. Это подтверждается и данными микроструктурного анализа (рис. 10).

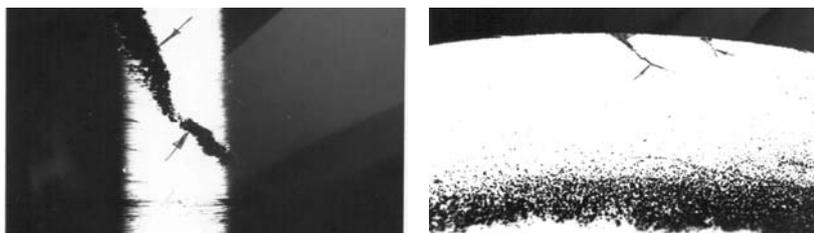


Рис. 10. Трещины на поверхности изношенного ПП и на поперечном микрошлифе

Глубина трещин может достигать до 30% от глубины закаленного слоя. Развитие трещины приводит к тому, что ослабленная часть металла отламывается и образуется каверна. Такое поверхностное разрушение характерно для высокопрочных материалов, испытывающих высокие контактные напряжения, например, подшипники, зубчатые колеса и т.д.

Шестой раздел посвящен изучению динамических задач для цилиндра конечной длины на примере ПП.

Проведенный анализ научных публикаций, посвященных построению аналитических подходов к решению задач контактного динамического деформирования полых цилиндрических деталей машиностроения, показал, что в общем случае, когда изучение колебаний сводится к решению основных граничных задач, возникают значительные математические трудности. Этим трудностям сопутствует существенное усложнение физической картины деформирования цилиндра. Кроме того, в области относительно

высоких частот необходимо учитывать пространственный характер волновых движений частиц цилиндра.

В связи с этим, предложенная в работе методика обобщения метода суперпозиции для построения решения пространственной динамической задачи вибрационного деформирования полых цилиндрических тел обладает достаточным элементом научной новизны. Суть ее состоит в возможности представления общего решения в виде суммы решений вспомогательных задач для бесконечного цилиндрического слоя и бесконечного слоя с плоскопараллельными границами. Применение интегральных преобразований для решения вспомогательных задач позволяет получить их решение в замкнутой форме.

Большой интерес представляет оценка роли граничных условий в формировании спектра РЧ и форм колебаний полых цилиндрических деталей. С этой точки зрения в работе проведено рассмотрение динамической смешанной контактной задачи, которая имеет выраженное прикладное значение. Получено интегральное уравнение, определяющее неизвестные напряжения в области контакта, которое замыкает определяющую СИУ относительно неизвестных функций вспомогательной задачи. Таким образом, получены возможности численного исследования всех особенностей контактного деформирования полых цилиндрических деталей при общем случае нагружения их внешней поверхности.

Разработана конечно-элементная методика определения РЧ и форм колебаний ПП ДВС. Ее особенность состоит в том, что при компьютерном моделировании учитывается технологическая неоднородность материала приповерхностных слоев детали, что выражается в изменении всего комплекса механических характеристик по глубине ПП. Это вносит существенные изменения в традиционные конечно-элементные схемы и позволяет проводить расчет РЧ и форм колебаний ПП в уточненной постановке с учетом геометрически и физически нелинейных свойств материала.

Образование и развитие трещин имеет усталостную природу, поэтому очень важно разработать методы диагностики пальцев на различных стадиях жизненного цикла: изготовление, ремонт и т.д. Предложенный в работе метод диагностики является разновидностью акустического метода. Применительно к контролю ПП такой метод является более производительным, чем существующие методы акустического контроля. Он требует меньше времени для проведения

замеров, поэтому можно подвергать контролю большие партии изделий. На первом этапе проводится численный анализ РЧ и строится амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) отклика на динамическое воздействие. Таким образом, получается «идеальная» АЧХ для бездефектного ПП. Далее экспериментально определяют АЧХ испытываемых ПП и сравнивают с идеальной. В работе принят один из наиболее эффективных методов возбуждения колебаний и диагностики различных конструкций и деталей машин – ударное испытание с регистрацией спектрального отклика на динамическое воздействие.

На рис. 12 представлены графики РЧ колебаний для ПП с трещиной и без трещины. Видно, что в высокочастотной области (более 100 КГц) наблюдается существенное расхождение этих числовых рядов.

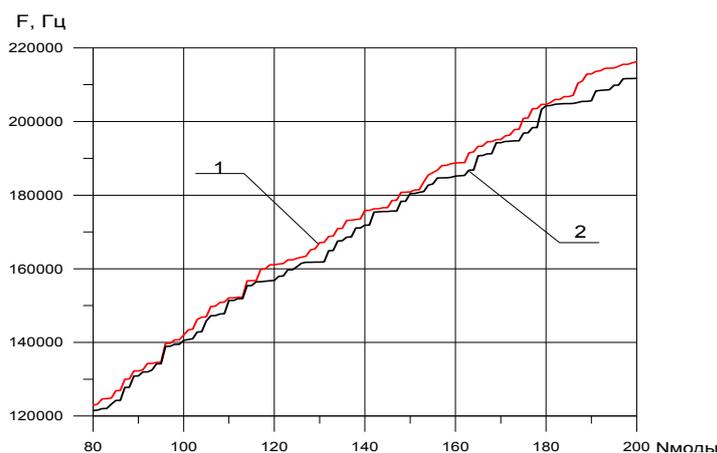


Рис. 12. Сравнение РЧ для ПП с трещиной (1) и без нее (2)

В результате проведенного анализа численного моделирования установлено, что:

1. Наличие дефектов в детали приводит к изменению спектра частот колебаний.
2. Величина «сдвига» частот зависит от размера и местоположения дефекта на внешней боковой поверхности ПП.

3. Если дефект находится в «кучности» колебаний, то соответствующая частота сдвигается на максимальную для данного размера дефекта величину.

4. Нахождение дефекта в «узле» колебаний не приводит к сдвигу соответствующей частоты. Теоретические результаты моделирования колебаний ПП с дефектами на внешней поверхности позволяют определить информативные параметры наличия дефектов в деталях рассматриваемой конфигурации по анализу их частотного спектра колебаний и АЧХ. По коэффициенту корреляции, можно обнаруживать дефекты типа трещины длиной 0,2 – 2% от длины ПП.

Полученные результаты показывают, что использование современных программных комплексов при математическом моделировании колебаний деталей машиностроения сложной внутренней структуры и последующего анализа спектра колебаний могут сделать метод свободных колебаний перспективным для проведения экспресс-контроля неоднородных деталей машиностроения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой приведено теоретическое обобщение и новое решение актуальной научно-технической проблемы разработки и реализации комплексного подхода к анализу характеристик динамического НДС деталей машиностроения и элементов конструкций из существенно неоднородных и анизотропных материалов. В диссертационной работе созданы новые методы расчета динамических прочностных характеристик неоднородных упругих тел сложной внутренней структуры, ориентированные на решение проблем проектирования новой техники, предназначенной для эксплуатации на резонансных режимах вибронагружения и находящихся в контактном взаимодействии. По теоретической и практической значимости результатов, полученных автором, можно считать, что в работе решена крупная научно-техническая проблема в области создания эффективных методов расчета динамических характеристик НДС для проектирования новой техники и прогрессивных технологий создания и восстановления деталей машин в транспортной и энергетической промышленности страны.

В работе на современном теоретическом уровне, с использованием последних достижений асимптотических методов динамической теории упругости и численных методов расчета, решены новые задачи в области динамической и конструктивной прочности деталей механизмов сложной внутренней неоднородной структуры с учетом особенностей возникающей при виброэксплуатации локальной КН и тонких динамических краевых и граничных эффектов, которые проявляются при работе на некоторых резонансных режимах и определяют несущую способность объекта.

В целом, созданные автором методы расчета и полученные в завершеном комплексном исследовании по теме диссертации новые результаты и выводы, представляют существенный научный вклад в развитие специальности 01.02.04. – механики деформируемого твердого тела.

Практическое значение работы заключается в том, что разработанный модифицированный численно-аналитический метод суперпозиции для расчетов на динамическую прочность структурно неоднородных деталей машин позволяет на единой методологической основе выполнить анализ несущей способности для проектируемых образцов новой техники и технологического оборудования.

Наиболее важные научные и практические результаты работы включают.

1. По сделанной в работе оценке состояния проблемы по теме диссертации сформулирован вывод о том, что существующие до настоящего времени методы расчета динамической прочности неоднородных упругих тел не позволяют их использование для большого класса структурно неоднородных объектов, эксплуатируемых в сложных условиях резонансного динамического и контактного виброн нагружения и отвечающих современным требованиям надежности и долговечности. Потребности в создании новой ресурсосберегающей техники и технологий, отвечающих всем требованиям производства и эксплуатации в сложных внешних условиях, определяют необходимость в создании новых методов расчета на прочность, учитывающих особенности, вносимые неоднородностью внутренней структуры исследуемых объектов. Это позволит дать практические рекомендации для научно обоснованного проектирования таких объектов и снижения их стоимости и отказаться от необоснованных упрощающих гипотез, применяемых в инженерных расчетах.

2. Для адекватного описания процессов динамического деформирования деталей составного сечения предложены специальные виды вспомогательных задач, основанные на свойствах нормальных мод каждой из подобластей сечения. Одной из наиболее важных черт развитого подхода является возможность априорной оценки асимптотического поведения неизвестных дополнительных функций, характеризующих вспомогательные задачи. Асимптотический анализ характера их особенности позволяет определить интенсивность КН в опасных зонах сечения.

3. Впервые, в рамках сформулированного в работе общего подхода к решению задач о гармонических колебаниях неоднородных упругих тел, на единой методологической основе дано комплексное исследование всех динамических характеристик НДС с учетом эффектов, вносимых локальной КН, возникающей в окрестности границы раздела разнородных областей и краевыми динамическими эффектами, проявляющимися на некоторых РЧ. Это связано с тем, что решение, полученное в рамках предлагаемого подхода, может быть представлено в виде нормальных волн, что позволяет дать более глубокую физическую трактовку найденного решения. Разработанные алгоритмы решения сформулированных в работе задач носят достаточно универсальный характер и могут быть применены для расчета волновых полей при различных граничных условиях и типах неоднородности внутренней структуры исследуемых объектов. В частности, впервые в рамках основного метода даны решения задач установившихся колебаний неоднородных деталей, составное сечение которых может состоять из трех или четырех сопрягаемых разнородных областей.

4. В работе всесторонне изучены эффекты локализации волновых движений для различных видов неоднородности сечения деталей. Интенсивность возникающей при этом КН определяется введенным критерием – ПЛО по напряжениям, значение которого определяется только упругими характеристиками стыкуемых сред составного сечения. Найдены определяющие уравнения для расчета этого параметра для случаев сопряжения двух, трех и четырех различных упругих сред. Дано обобщение ПЛО на анизотропные среды. Результаты численного анализа ПЛО, приведенные в работе, позволяют еще на этапе проектирования составного сечения оптимальным образом подбирать сочетания упругих характеристик стыкуемых сред с целью минимизации интенсивности локальной КН.

Асимптотический анализ значения ПЛО позволяет применять полученные результаты и при проектировании клеевых и паяных стыковых соединений.

5. Разработанные в работе методы решения граничных задач динамической теории упругости использовались для подробного анализа спектров РЧ и кинематических и энергетических характеристик собственных форм составных, анизотропных и технологически неоднородных деталей с упрочненными приповерхностными слоями. Для различных видов сочетаний геометрических и упругих параметров сечения (в том числе и в зависимости от мер анизотропии различных областей сечения) проанализированы зоны протяженности действия краевых и граничных динамических эффектов и определены условия соотношения этих параметров, при которых указанными эффектами типа пограничного слоя можно в инженерных расчетах пренебречь.

6. Выполнены исследования по проверке достоверности предложенных методов и программного обеспечения путем их тестирования в ряде примеров, имеющих известные аналитические решения и экспериментальные результаты. Численные результаты, полученные в работе с использованием построенных решений граничных задач, сопоставлены с численными результатами, полученными при помощи МКЭ. Дополнительным контролем достоверности в каждой рассматриваемой задаче служила точность удовлетворения граничных условий и условий сопряжения. Сравнение численных результатов с полученными ранее численными, аналитическими и экспериментальными данными других авторов показало, что максимальное расхождение для наиболее сложных случаев неоднородности не превышало 12%, что свидетельствует о достаточной степени адекватности предложенных в работе методов, алгоритмов и определяющих уравнений. Анализ возникающих погрешностей в зависимости от частотного параметра вибронагружения позволяет достаточно четко локализовать частотные диапазоны, в которых возможно использование построенных решений.

7. Впервые в рамках основной методики разработано обобщение метода суперпозиции для решения пространственных динамических контактных задач вибродеформирования конечных полых цилиндрических деталей, что имеет ярко выраженное прикладное значение ввиду широкого применения таких деталей в машиностроении. Между тем подобные задачи рассмотрены на данный

момент, в основном, только для осесимметричных случаев. В результате получена определяющая СИУ относительно неизвестного динамического контактного давления в зоне контакта.

8. Получены результаты экспериментальных исследований по определению комплекса механических характеристик материала приповерхностных слоев деталей механизмов и машин. Ввиду технологической неоднородности материала большинства ответственных деталей, связанных с упрочнением их поверхностных слоев, можно признать, что существующие методы определения механических свойств не отвечают современным требованиям контроля качества реальных объектов по точности и диапазону применимости. Учитывая большое отличие структуры и НДС поверхностного слоя металла от основного металла, из которого изготовлена деталь, в работе детально рассмотрена структура толщи приповерхностного слоя по отдельным зонам, начиная от наружной поверхности до основного материала детали. Для организации анализа качества неоднородных материалов предложен новый метод, основанный на ударном вдавливании инденторов и регистрации комплекса показателей внедрения. В качестве примера выбран материал ПП ДВС. Полученные данные использованы при разработке конечно-элементной схемы решения задачи об определении поля динамических контактных напряжений в ПП, что позволяет существенно уточнить применяемые ранее упрощенные инженерные схемы прочностного расчета ПП.

9. Впервые на примере ПП ДВС создано программное обеспечение и разработана численно-экспериментальная схема диагностики качества поверхностных слоев технологически неоднородных деталей машиностроения, основанная на методе собственных колебаний и позволяющая при поточном контроле отбраковывать дефектные детали. В работе приведены данные расчетов высокочастотных форм колебаний и соответствующих им частот ПП, проведенные с учетом закономерностей изменения механических характеристик по толщине ПП. Теоретические результаты моделирования колебаний ПП с дефектами на внешней поверхности позволяют определить информативные параметры наличия дефектов в деталях рассматриваемой конфигурации по анализу частотного спектра колебаний.

10. Полученные автором решения задач теории динамического расчета упругих тел сложной внутренней структуры позволяют

существенно сократить объем экспериментальных исследований или полностью их исключить, что дает возможность значительно снизить затраты материальных ресурсов, денежных средств и времени на отработку изделий. Кроме того, отдельные теоретические результаты являются определенным вкладом в общую теорию распространения волн в упругих неоднородных анизотропных телах с нерегулярной границей. Результаты экспериментальных, аналитических и численных исследований кусочно-однородных, анизотропных и технологически неоднородных деталей, приведенные в работе, получены в рамках госбюджетных и хоздоговорных тем. Это нашло практическое внедрение результатов работы в практике проектирования и технологических процессах на ряде предприятий различных отраслей. Они также используются в учебных процессах нескольких ведущих вузов России и Украины.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Вовк Л.П. Динамические задачи для тел сложной структуры. – Ростов-на-Дону: Ростовский гос. строит. ун-т, 2003. – 169с.
2. Вовк Л.П. Особенности локальной концентрации волнового поля на границе раздела упругих сред. – Донецк: Норд-Пресс, 2004. – 267с.
3. Вовк Л.П. Асимптотическое исследование собственных колебаний неоднородного прямоугольника с внутренним отверстием // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Естеств. науки. – 2001. – №1. – С. 29-33.
4. Вовк Л.П. Особенности гармонических колебаний кусочно-неоднородной прямоугольной области // Известия вузов. Сев. Северо-Кавказский регион. Естеств. науки. – 2002. – №4. – С. 9-13.
5. Вовк Л.П. К определению комплекса механических характеристик неоднородных материалов ударным вдавливанием индентора // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2003. – Т. 69. – №1. – С. 45-48.
6. Вовк Л.П. Напряженно-деформированное состояние поршневого пальца при динамическом нагружении // Вестник машиностроения. – 2003. – №8. – С. 27-29.
7. Вовк Л.П. Об особенностях волнового поля в зоне скачкообразного изменения упругих свойств кусочно-неоднородных

областей // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естеств. науки. – 2003. – №3. – С. 25-28.

8. Вовк Л.П. Обобщение метода суперпозиции в задачах о гармонических колебаниях прямоугольных областей произвольной кусочно-неоднородной структуры // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естеств. науки. – 2003. – №4. – С. 19-23.

9. Вовк Л.П. Особенности расчета полей контактных напряжений в поршневых пальцах с учетом их неоднородности // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технич. науки.– 2003. – Приложение №3. – С. 126-130.

10. Вовк Л.П. Исследование динамических эффектов, возникающих при вибронагружении стыковых паяных соединений // Известия вузов. Сев.-Кав. регион. Технические науки. – 2004. – №1. – С. 60-64.

11. Вовк Л.П. Математическое исследование особенностей концентрации динамических напряжений в окрестности паяного шва в условиях резонанса. – Сварочное производство. – 2004. – №5. – С. 7-12.

12. Вовк Л.П. Анализ локальной особенности по динамическим напряжениям в окрестности сингулярных точек границы неоднородного прямоугольника с внутренним отверстием // Известия вузов. Сев-Кав. Регион. Естественные науки. – 2004. – №1. – С. 30-32.

13. Вовк Л.П. Исследование локальной особенности волновых характеристик около угловой точки линий раздела составного тела. - Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естеств. науки. – 2004. – №2. – С. 38-42.

14. Вовк Л.П. Динамическая пространственная задача вибродеформирования конечных цилиндров // Научная мысль Кавказа. Приложение. – 2003. – №7. – С. 122-128.

15. Вовк Л.П., Лупаренко Е.В., Соболев Б.В. Асимптотический метод исследования волновых полей в анизотропной прямоугольной области Вестник Донского гос. техн. ун-та. – 2001. – Т. 1. – №2(8) – С. 57-65.

16. Вовк Л.П., Лупаренко Е.В. О влиянии анизотропии на характеристики волнового поля прямоугольных областей // Вестник Донского гос. техн. ун-та. – 2002. – Т. 2. – №3(13). – С. 238-244.

17. Вовк Л.П. Анализ влияния упругих констант основного материала и припоя на динамическую прочность угловых паяных соединений // «Научная мысль Кавказа». Приложение.– 2003.– №13. – С. 139-144.

18. Вовк Л.П. Особенности динамического напряженного состояния в окрестности границ раздела трех различных сред. «Научная мысль Кавказа». Приложение.– 2004.– №2. – С. 99-104.
19. Вовк Л.П., Лупаренко Е.В. Влияние несимметрии на вибродинамические характеристики кусочно-неоднородной анизотропной детали прямоугольного сечения // Научная мысль Кавказа. Приложение. – 2003. – №4. – С. 88-92.
20. Вовк Л.П., Лупаренко Е.В. Общий метод исследования установившихся колебаний анизотропных прямоугольных областей произвольной кусочно-неоднородной структуры // Научная мысль Кавказа. Приложение. – 2003. – №8. – С. 119-124.
21. Вовк Л.П., Соболев Б.В. О динамической концентрации напряжений на границах раздела сред с различными упругими свойствами // Вестник Донского государственного технического ун-та. – 2003. – Т. 3. – №4(18). – С. 416-424.
22. Вовк Л.П. О динамическом изнашивании структурно-неоднородных элементов конструкций прямоугольной формы // Проблемы трибологии (Problems of Tribology). – 2000. – №1. – С. 118-122.
23. Вовк Л.П. Численно-аналитический метод исследования вибрационных характеристик кусочно-неоднородных элементов конструкций прямоугольной формы // Сб. трудов научно-техн. семинара «Применение низкочастотных колебаний в технологических целях»(2-7 окт. 2000г.). – Ростов-на-Дону, 2000. – С. 73-76.
24. Вовк Л.П., Лупаренко Е.В., Соболев Б.В. Численно-аналитический анализ вибродеформирования поперечно-неоднородных в плане деталей // «Динамика технологических систем». Тр. VI-й Междунар. научно-технич. конф.(ДГТУ, Ростов-на-Дону). – 2001. – Т. 1. – С. 76-82.
25. Вовк Л.П. Исследование вибрационных прочностных характеристик неоднородных деталей методом ударного вдавливания индентора // Вибрации в технике и технологиях. – 2002. – Т. 24. – №3. – С. 19-21.
26. Вовк Л.П. Математично-експериментальна модель рішення задачі аналізу напружено-деформованого стану поршневих пальців // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2002. – №6 / Ч.1. – С. 102-104.
27. Вовк Л.П., Лупаренко Е.В. Про один метод дослідження вібраційних характеристик кусочно-неоднородних елементів

конструкций прямоугольной формы // Вибрации в технике и технологиях. – 2002. – Т. 24. – №3. – С. 22-25.

28. Вовк Л.П. Оценка полей контактных напряжений в цилиндро-поршневой группе деталей двигателей внутреннего сгорания // Тез. докл. Междунар. конф. «Проблемы надежности машин и конструкций», Минск, 24-26 сент. 2002г. – Минск. – 2002. – С. 26-27.

29. Вовк Л.П., Лупаренко Е.В. Об установившихся колебаниях анизотропных неоднородных прямоугольных областей // Системні технології. – 2001. – №2(13). – С. 28-33.

30. Вовк Л.П. Определение поля контактных напряжений в деталях с учетом неоднородности их внутренней структуры // Тез. докл. 2-й Всеукр. науч. конф. «Математичні проблеми технічної механіки», Днепродзержинск, 22-24 апр. 2002г. – Днепродзержинск. – 2002. – С. 108.

31. Вовк Л.П. Исследование вибрационных прочностных характеристик неоднородных деталей методом ударного вдавливания индентора // Вопросы вибрационной технологии: Межвуз. сб. науч. статей. – Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2002. – С. 54-59.

32. Вовк Л.П., Лупаренко Е.В. Об установившихся колебаниях упругого кусочно-неоднородного анизотропного прямоугольника несимметричной структуры // Системні технології. – 2002. – №5(22). – С. 21-25.

33. Вовк Л.П. Определение поля контактных напряжений в деталях с учетом неоднородности их внутренней структуры // Системні технології. – 2002. – №5(22). – С. 63-69.

34. Вовк Л.П. Анализ различных подходов численного и экспериментального исследования влияния неоднородности структуры деталей на их прочностные характеристики // Перспективные задачи инженерной науки. – 2002. – Вып. 4. – С. 99-105.

35. Вовк Л.П. Дослідження напружено-деформованого стану поршневих пальців у динамічній постановці // Збірник наукових праць Українського державного морського технічного університету ім. адмірала Макарова. – 2002. – №5(383). – С. 102-107.

36. Вовк Л.П. Анализ комплекса механических характеристик приповерхностных слоев неоднородных деталей // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. научных трудов. – Донецк: ДГТУ, 2003. – С. 13-17.

37. Вовк Л.П., Писанец А.А. К решению пространственной динамической задачи для полого цилиндра конечной длины //

«Строительство-2003»: Материалы Междунар. научно-практической конф. – Ростов-на-Дону: Ростовский гос. строит. ун-т, 2003. – С. 108-109.

38. Вовк Л.П. Анализ характера концентрации динамических напряжений при вибронагрузении сваренных неоднородных деталей // Вопросы вибрационной технологии: Межвуз. сб. научных статей. – Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2003. – С. 119-125.

39. Вовк Л.П., Писанец А.А. Динамическая пространственная задача для неоднородного цилиндра // IV-й Всероссийский симпозиум по прикладной и промышленной математике. Тез. докл. – Обзорение прикладной и промышленной математики. – 2003. – Т. 10. – Вып. 2. – С. 454-456.

40. Вовк Л.П. Анализ локальных особенностей волнового поля в сингулярных точках составной области // Вісник Сумського держ. університету. – 2003. – №10(56). – С. 144-156.

41. Вовк Л.П. Влияние концентрации динамических напряжений на надежность стыковых паяных соединений при их виброобработке // Вестник Донецкого ин-та автомоб. тр-рта. – 2004. – №1. – С. 26-32.

42. Вовк Л.П. Построение общего решения и определение характеристик волнового поля для многослойных прямоугольных областей // Збірник наукових праць Українського державного морського технічного університету ім. адмірала Макарова. – 2003. – №6(392). – С. 63-74.

43. Вовк Л.П., Лупаренко Н.В. Про побудову математичної моделі прогнозування міцнісних властивостей виробів машинобудування неоднорідної структури // Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції "Наука і освіта–2004". Т.70. Математика. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2004. – С. 24-25.

44. Вовк Л.П. Использование спектра собственных частот для определения дефектов в неоднородных телах // Тез. докл. X-й Междунар. научной конф. им. акад. М. Кравчука.– Киев, 13-15 мая 2004 г. – Киев: НТУУ, 2004. – С. 64.

45. Вовк Л.П. Дослідження локальних особливостей динамічних напружень в сингулярних точках складеної област // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2004. – Т. 2. – №2. – С. 35-45.

Личный вклад соискателя в работы, опубликованные в соавторстве. В работах [4,5,10] проведена аналитическая

разработка численно-аналитической схемы решения, вывод системы интегральных уравнений, ее асимптотический и численный анализ. В работе [8] разработан способ построения характеристик НДС в рамках гипотез плоской деформации деталей составного сечения прямоугольной формы. В работе [13] проведена математическая формулировка задачи, построение общего решения, реализация модифицированного метода суперпозиции, построение мод Ламе для ортотропных материалов и проверка достоверности полученных результатов. В работах [16,24] поставлена задача и проведено обобщение основной математической схемы на случай несимметричного составного изотропного и анизотропного сечения, выведены уравнения для определения показателей локальной особенности во всех трех особых точках неоднородного сечения. В работах [21,31] разработана модификация метода суперпозиции и решены задачи для плоскопараллельного и цилиндрического слоев, выведена система интегральных уравнений контактной задачи. В работе [29] произведена формулировка начальной краевой задачи, построение общего решения в многослойной области, вывод и асимптотический анализ системы интегральных уравнений, проверка достоверности расчетной схемы. В работе [33] проведена численная реализация определения показателей при особенности у нерегулярных членов асимптотики решения, коэффициентов концентрации напряжений и их зависимости от частоты и упругих параметров составного сечения, а также формулировка выводов. В работе [40] разработана конечно-элементная методика исследования спектра собственных частот однородных и неоднородных цилиндров и проведена систематизация численных результатов.

АННОТАЦИЯ

ВОВК Л.П. Теоретические и экспериментальные методы расчета деталей машин из неоднородных и анизотропных материалов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.02.04. – «Механика деформируемого твердого тела». – Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, 2004.

Объект исследований – структурно-неоднородные детали машиностроения с усложненными физико-механическими свойствами.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-прикладной проблемы – развитию теории и совершенствованию математической, численной и экспериментальной методики исследования особенностей динамического НДС неоднородных деталей, находящихся в вибрационном поле, с учетом неоднородности и анизотропии их внутренней структуры. Разработан универсальный модифицированный численно-аналитический метод суперпозиции для исследования всех особенностей волнового поля в деталях с кусочно-неоднородным и анизотропным составным сечением. Введен и научно обоснован новый обобщенный критерий прочности составных тел – параметр локальной особенности по напряжениям, который характеризует интенсивность локальной концентрации напряжений в опасных зонах сечения детали. Выполнена оценка влияния анизотропии, упругих и геометрических параметров сечения на характеристики волнового поля, в том числе, и на тонкие динамические эффекты граничного и краевого резонансов. Разработана экспериментальная методика ударного вдавливания индентора для определения комплекса механических характеристик технологически неоднородных деталей. На ее основе разработано программное обеспечение для уточненного расчета динамических контактных напряжений при работе технологически неоднородных деталей цилиндрической группы ДВС. Разработана численно-экспериментальная методика акустического диагностирования качества приповерхностных слоев неоднородных деталей машин.

неоднородные детали, численно-аналитические методы, резонансные частоты, прочностные характеристики, концентрация динамических напряжений, локальные динамические эффекты.