

На правах рукописи



Лысенко Александр Петрович

**МЕТОДЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КОМПОЗИТНЫХ УПРУГИХ МУФТ**

2.5.17 Теория корабля и строительная механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Крыловский государственный научный центр» на отделении прочности и надежности конструкций объектов морской техники.

Научный руководитель:

Ярцев Борис Александрович

доктор технических наук, начальник сектора исследования свойств композиционных материалов и моделирования происходящих в них процессов ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Официальные оппоненты:

Полилов Александр Николаевич

доктор технических наук, профессор главный научный сотрудник, исполняющий обязанности заведующего лабораторией ФГБУ науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН»

Модестов Виктор Сергеевич

кандидат технических наук заместитель заведующего лабораторией «Механика материалов»

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»

Защита состоится «__» _____ 20__ года в __ часов ____ минут на заседании диссертационного совета 31.1.003.01 при ФГУП «Крыловский государственный научный центр» по адресу: 196158, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на официальном сайте ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (<https://krylov-centre.ru/about/councils/obyavleniya-ob-otkrytykh-zashchitakh/>).

Автореферат разослан «__» _____ 20__ года

Ученый секретарь
диссертационного совета 31.1.003.01
кандидат технических наук, доцент

О.В. Малышев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Работа судовых пропульсивных комплексов сопровождается вибрациями и ударами, снижающими прочность и долговечность приводных механизмов. Поэтому задача повышения надежности пропульсивных комплексов, подверженных динамическим нагрузкам, прежде всего, должна решаться путем снижения самих динамических нагрузок.

Апробированным средством снижения величин динамических воздействий на приводные механизмы являются виброизоляторы специальных конструкций – упругие муфты. В настоящее время существует множество подобных конструкций, которые можно свести к двум основным группам: металлические и резино-металлические упругие муфты. Однако, наметившийся переход на низкочастотную амортизацию судовых энергетических установок, потребовал существенного повышения деформативности упругих муфт, что привело к проведению исследований по разработке новых конструкций. Результатом исследований стало создание упругих муфт из полимерных композитов, основным недостатком которых является низкий уровень вибропоглощения. Поэтому особую актуальность приобрела задача создания новых конструкций композитных упругих муфт с более высокими диссипативными характеристиками. Приоритет создания таких конструкций (2014 г.) принадлежит коллективу специалистов ФГУП «Крыловский государственный научный центр», членом которого является автор настоящей работы.

Существующие композитные упругие муфты с высокими диссипативными характеристиками представляют собой неоднородные структуры, образованных совокупностью слоев материалов с различными физико-механическими характеристиками. Одни слои обеспечивают прочность и надежность конструкции в целом, а другие слои позволяют реализовывать высокие уровни демпфирования.

Разработка композитных упругих муфт с высоким уровнем демпфирования требует учета особенностей материалов всех слоев, компонуемых в состав конструкции. К таким особенностям, в первую очередь, относятся анизотропия физико-механических свойств материалов силовых элементов конструкции, а также существенная температурно-частотная зависимость упруго-диссипативных характеристик вязкоупругих полимеров вибропоглощающих слоев. Наиболее продуктивным способом учета отмеченных особенностей, является применение методов математического

моделирования, использование которых позволит создавать композитные упругие муфты, обладающие требуемыми характеристиками жесткости, прочности и демпфирования.

Цель работы заключается в разработке методов численного моделирования диссипативно-жесткостных характеристик и прочности композитных упругих муфт и исследовании процессов, происходящих в этих муфтах в предполагаемых условиях эксплуатации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **основные задачи**:

– выполнить анализ существующих математических моделей упругих, диссипативных, прочностных характеристик слоев композита и слоистых композитных структур при различных условиях нагружения;

– разработать математическую модель прогнозирования эффективных прочностных характеристик симметричных слоистых композитных структур при изгибе/кручении;

– выполнить сравнительные исследования величин эффективных упругих, диссипативных и прочностных характеристик слоистых композитных структур, определенных в условиях растяжения/сжатия и в условиях изгиба/кручения;

– разработать метод численного моделирования статических упругих характеристик и прочности композитной упругой муфты;

– разработать метод численного моделирования диссипативных характеристик композитной упругой муфты;

– развить метод численного моделирования нестационарных колебаний композитной упругой муфты;

– применить разработанные методы численного моделирования к исследованию нестационарных колебаний, а также к исследованию влияния температуры среды эксплуатации и погрешностей изготовления на значения собственных частот и коэффициентов механических потерь композитной упругой муфты.

Методы исследования: при постановке и численном решении задач, рассматриваемых в диссертационной работе, использовались методы и положения теории упругости, теории вязкоупругости, механики композитов, методы и средства вычислительной механики как основной аппарат математического моделирования.

Достоверность результатов подтверждена хорошим согласованием расчетных и

экспериментальных значений статических нагрузочных характеристик, статических жесткостей, собственных частот и коэффициентов механических потерь, а также предельного крутящего момента опытных конструкций сборной композитной упругой муфты.

Научная новизна:

1. Разработана математическая модель прогнозирования эффективных прочностных характеристик симметричных слоистых композитных структур при изгибе/кручении;

2. Разработаны новые методы численного моделирования:

– диссипативно-жесткостных характеристик и прочности композитной упругой муфты;

– нестационарных колебаний композитной упругой муфты.

3. Выполнены исследования:

– влияния последовательности укладки слоев материалов на величины эффективных свойств слоистых композитов, определяемых при различных условиях нагружения;

– влияния температуры среды эксплуатации и погрешностей изготовления на значения собственных частот и коэффициентов механических потерь композитной упругой муфты.

4. Определены статические жесткостные характеристики, предельное состояние, диссипативные характеристики при нестационарных колебаниях композитной упругой муфты, позволившие оценить влияние рабочих процессов на напряженно-деформированное состояние и значение коэффициента механических потерь.

Практическая значимость результатов работы: разработанные методы моделирования упруго-диссипативных характеристик и прочности позволяют минимизировать объемы экспериментальной проверки вновь разрабатываемых конструкций композитных упругих муфт с повышенным уровнем диссипативных характеристик. На основе предлагаемых методов, разработаны две конструкции композитных упругих муфт, новизна которых подтверждена двумя патентами РФ.

Реализация результатов работы. Результаты работы использовались при выполнении работ:

– ФГУП «Крыловский государственный научный центр» с отечественными и

зарубежными заказчиками по контрактам № 10411.1007400.09.008. от 31.03.2010 г., № V021/2010CSOC/JK210RU-P/015634240225 от 09.11.2010 г;

– АО «Научно-производственное предприятие «МОРСКАЯ ТЕХНИКА» по договору № 9Э-19/82-7101/19/МТ/2-20 от 04.02.2020 г. «Разработка, изготовление и ввод в эксплуатацию малошумного привода гребного винта (для кавитационной трубы)», шифр «Гидропривод-ГВ».

На защиту выносятся:

1. Математическая модель прогнозирования эффективных прочностных характеристик симметричных слоистых композитных структур при изгибе/кручении.

2. Методы численного моделирования:

- статических упругих характеристик и прочности композитной упругой муфты;
- диссипативных характеристик композитной упругой муфты;
- нестационарных колебаний композитной упругой муфты.

Апробация работы. Основные материалы исследования докладывались и получили положительную оценку на 11 научно-технических конференциях.

Личный вклад автора заключается в постановке задач исследования, планировании и организации всех этапов работы. Диссертанту принадлежат: методы математического моделирования эффективных прочностных характеристик слоистых композитов, а также методы численного моделирования диссипативно-жесткостных характеристик и прочности, нестационарных колебаний упругих композитных муфт, результаты численных исследований, обработка и обобщение экспериментальных данных лабораторных исследований.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 134 страницах машинописного текста, включая 65 рисунков, 6 таблиц, 2 страницы оглавления и список литературы из 141 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, описана постановка задачи, сформулированы результаты, выносимые на защиту, а также научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава посвящена анализу существующих методов математического моделирования напряженно-деформированного состояния, прочности и диссипативных

характеристик конструкций из полимерных композитов.

Отмечено, что линейность диаграмм деформирования волокнистых полимерных композитов обуславливает физически линейную постановку задач по определению напряженно-деформированного состояния большинства композитных конструкций. Такая постановка основана на использовании либо теорий анизотропных пластин и оболочек различной степени точности (2D-теории), либо теории упругости анизотропного тела (3D-теории).

Показано, что все существующие 2D-теории построены на основе трех основных методов: метода гипотез, метода разложения в ряд по толщине, метода асимптотического решения трехмерных уравнений. Наиболее близок к инженерным представлениям – метод гипотез, связанный с именами Г. Кирхгоффа, С.П. Тимошенко, Е. Рейсснера, Х.М. Муштари. В свою очередь теории, построенные на основе метода гипотез делятся на две группы, различающиеся представлением неоднородной структуры в качестве либо совокупности конечного множества независимых слоев (гипотеза ломаной линии), либо целостным эквивалентом (гипотеза эквивалентного слоя). Характерной чертой теорий, основанных на гипотезе ломаной линии, является зависимость порядка разрешающей системы уравнений от количества слоев. Для теорий второй группы, порядок разрешающей системы уравнений остается постоянным независимо от количества слоев. Для конструкции любой формы и любого вида и приложенных к ней внешних воздействий, использование соотношений геометрически нелинейной теории упругости анизотропного тела, позволяют получать параметры напряженно-деформированного состояния в численной форме.

Показано, что моделирование разрушения композитных конструкций целесообразно выполнять на основе феноменологических критериев прочности, представляющих собой соотношения между элементами тензора напряжений в точке, которые должны быть выполнены, когда в этой точке возникает предельное состояние. Таким образом, для оценки прочности композитной конструкции нужны, определенные с той или иной степенью точности, параметры ее напряженно-деформированного состояния и свойства материала, сравнение с которыми позволит сделать вывод о сохранении работоспособности конструкции. Специфичность композитных материалов, обладающих широким спектром упругих и прочностных свойств, а также большим количеством механизмов разрушения, не позволяет ориентироваться на какой-либо

один критерий прочности. Распространение среди инженеров получили критерии Е.К. Ашкенази, А.К. Малмейстера, И.И. Гондельблата-В.А. Копнова, Цая-Хилла, Цая-Ву и других исследователей.

Указано одно из важнейших преимуществ полимерных композитов – высокие демпфирующие свойства, превосходящие аналогичные показатели для металлов и сплавов на 1-2 десятичных порядка. Это позволяет рассматривать демпфирование в композитных конструкциях не как полезный вторичный эффект, а как один из основных параметров проектирования. Отмечено, что выполненные отечественными и зарубежными авторами исследования влияния составов и структур армирования композита и температурных режимов эксплуатации на демпфирующую способность, позволили установить недостаточность реализуемых уровней рассеяния энергии для снижения амплитуд резонансных колебаний некоторых композитных конструкций до требуемых величин. Поэтому появились предложения по способам существенного повышения диссипации энергии за счет введения в состав слоистой структуры вязкоупругих материалов, пьезоэлектрических элементов, металлов с памятью формы и др. В реальной практике наибольшее распространение получил первый из перечисленных способов – включение в состав слоистой структуры слоев вязкоупругих полимеров.

Вторая глава посвящена описанию нового метода моделирования эффективных прочностных характеристик симметричных слоистых композитных структур при изгибе/кручении.

Отмечено, что прогнозирование реакции слоистых композитов и конструкций из них на приложенные воздействия выполняется по одной из двух схем. В первой схеме принимается, что слоистый материал состоит из однородных ортотропных слоев. Материал рассчитывается последовательно слой за слоем по известным механическим свойствам каждого типа слоев, компонуемых в слоистую структуру. При этом требуется выполнять расчет полей деформаций и полей напряжений в каждом слое для каждого сочетания нагрузок и ориентации слоев. При использовании второй схемы слоистый материал заменяется однородным анизотропным эквивалентом, деформирование которого описывается эффективными характеристиками, определяемыми для каждой слоистой структуры.

Традиционно при разработке конструкций используются экспериментальные величины эффективных характеристик слоистых композитов, определенные при

испытаниях на одноосное растяжение/сжатие и сдвиг в плоскости армирования опытных образцов. Полученные результаты используются и для прогнозирования деформирования композитных конструкций, к которым помимо мембранных усилий приложены изгибающие и крутящие моменты. При этом независимо от числа и ориентации компонуемых слоев слоистый композит рассматривается как ортотропный материал. В то же время очевидно, что зависящая только от относительного объемного содержания слоев компонуемых материалов, величина любой эффективной характеристики при одноосном растяжении/сжатии и сдвиге может значительно отличаться от аналогичной величины при изгибе/кручении, на которую помимо относительного объемного содержания также влияет последовательность расположения слоев по толщине структуры. Поэтому эффективные свойства слоистых композитов должны определяться для заранее оговоренных условий нагружения.

Известны соотношения, позволяющие прогнозировать эффективные упругие и диссипативные характеристики симметричных слоистых композитов при одноосном растяжении/сжатии и при изгибе/кручении. Также существует метод вычисления эффективных пределов прочности рассматриваемых слоистых структур при одноосном растяжении/сжатии. В данной работе предложен недостающий алгоритм вычисления эффективных пределов прочности при изгибе/кручении, содержащий следующую последовательность операций:

– определение элементов вектора кривизны и кручения слоистого композита $\{\bar{k}\} = \{k_x \quad k_y \quad k_{xy}\}^T$, порождаемых поочередным приложением изгибающих M_x , M_y и крутящего M_{xy} моментов;

– вычисление величин элементов $2n$ векторов напряжений $\{\bar{\sigma}\}_k = \{\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_{xy}\}_k^T$ на верхних и нижних поверхностях каждого слоя ($k = \overline{1, n}$) слоистой структуры в глобальной системе координат xuz ;

– преобразование $2n$ векторов напряжений на верхних и нижних поверхностях каждого слоя слоистой структуры от глобальной системы координат xuz к естественным системам координат $(123)_k$ $\{\sigma\}_k = \{\sigma_1 \quad \sigma_2 \quad \sigma_6\}_k^T$.

Подстановка элементов векторов $\{\sigma\}_k$ в критерий прочности Цая-Ву позволяет определить $2n$ предельное значение изгибающих \hat{M}_x , \hat{M}_y и крутящего \hat{M}_{xy} моментов,

соответствующих $2n$ верхним и нижним поверхностям каждого слоя слоистой структуры. Предельное состояние слоистой структуры в целом определяется слоем, на одной из поверхностей которого предельное состояние достигается при наименьших величинах приложенных моментов. Величины эффективных пределов прочности вычисляются по формулам: $\tilde{\sigma}_x = 6\widehat{M}_{x \min}^{(k)} / h^2$, $\tilde{\sigma}_y = 6\widehat{M}_{y \min}^{(k)} / h^2$, $\tilde{\sigma}_{xy} = 6\widehat{M}_{xy \min}^{(k)} / h^2$.

Приведены результаты сравнительного исследования влияния ориентации слоев на эффективные упругие ($\tilde{E}_x = \tilde{E}_x(\theta)$, $\tilde{E}_y = \tilde{E}_y(\theta)$, $\tilde{G}_{xy} = \tilde{G}_{xy}(\theta)$, $\tilde{\nu}_{xy} = \tilde{\nu}_{xy}(\theta)$, $\tilde{\nu}_{yx} = \tilde{\nu}_{yx}(\theta)$), диссипативные ($\tilde{\eta}_x = \tilde{\eta}_x(\theta)$, $\tilde{\eta}_y = \tilde{\eta}_y(\theta)$, $\tilde{\eta}_{xy} = \tilde{\eta}_{xy}(\theta)$) и прочностные ($\tilde{\sigma}_x = \tilde{\sigma}_x(\theta)$, $\tilde{\sigma}_y = \tilde{\sigma}_y(\theta)$, $\tilde{\sigma}_{xy} = \tilde{\sigma}_{xy}(\theta)$) характеристики уравновешенного ($[+\theta / -\theta]_{ns}$) и квазиизотропного в плоскости армирования ($[0^0 + \theta / 45^0 + \theta / -45^0 + \theta / 90^0 + \theta]_{ns}$) симметричных слоистых композитов, определенных при различных условиях нагружения. Материал слоев композита – стеклопластик Т-10-14 / DION FR 9300.

На рис. 1 изображены графики функций максимальных расхождений величин эффективных упругих, диссипативных и прочностных характеристик рассматриваемых слоистых композитов, определенных при различных условиях нагружения. Здесь θ – угол между направлением армирующих слоев и направлением приложения усилия; $|\Delta_{\alpha \max}| = |\Delta_{\alpha \max}(n)|$; $(\Delta_{\alpha} = [(\tilde{\alpha}_{t/c} / \tilde{\alpha}_{b/T}) - 1] \cdot 100\%)$; $\tilde{\alpha} = \tilde{E}_x, \tilde{E}_y, \tilde{G}_{xy}, \tilde{\nu}_{xy}, \dots$; t/c – растяжение/сжатие; b/T – изгиб/кручение.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 1, позволил установить, что по мере увеличения числа повторяющихся пакетов слоев n уменьшаются расхождения величин соответствующих эффективных характеристик, вычисленных при различных условиях нагружения. В частности:

– уравновешенный слоистый композит $[+\theta / -\theta]_{ns}$ ($\theta \in [-90^0, 90^0]$) при $n \geq 2$ можно приближенно считать ортотропным однородным материалом и прогнозировать его эффективные упругие, диссипативные и прочностные характеристики при изгибе/кручении, используя значения аналогичных характеристик, полученные при испытаниях образцов на одноосное растяжение/сжатие;

– эффективные упругие и диссипативные характеристики слоистого композита $[0^0 + \theta / 45^0 + \theta / -45^0 + \theta / 90^0 + \theta]_{ns}$ при одноосном растяжении/сжатии соответствуют

изотропному материалу, а при изгибе/кручении этот слоистый композит классифицируется как моноклинный материал;

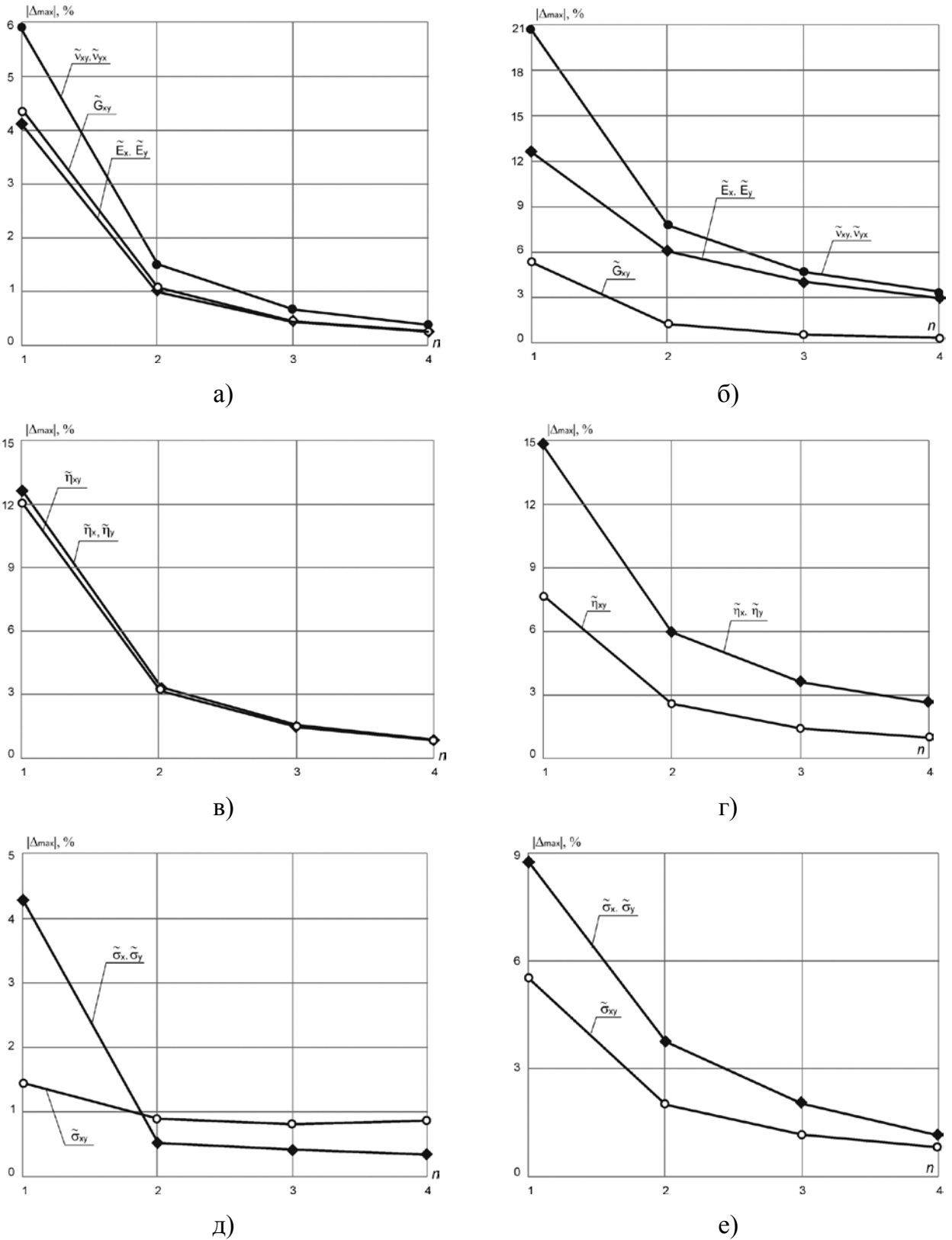


Рис. 1. Зависимости максимальных расхождений величин эффективных упругих, диссипативных и прочностных характеристик слоистых композитов $[+\theta / -\theta]_{ns}$ (а), (в), (д) и $[0^0 + \theta / 45^0 + \theta / -45^0 + \theta / 90^0 + \theta]_{ns}$ (б), (г), (е), вычисленных при растяжении/сжатии и при изгибе/кручении для различных значений n

– эффективные пределы прочности слоистого композита $[0^\circ + \theta / 45^\circ + \theta / -45^\circ + \theta / 90^\circ + \theta]_{ns}$ как при одноосном растяжении/сжатии, так и при изгибе/кручении являются функциями угла θ , т.е. рассматриваемая слоистая структура не квазиизотропна. При одноосном растяжении/сжатии в плоскости армирования она должна классифицироваться как ортотропная. При изгибе/кручении слоистую структуру $[0^\circ + \theta / 45^\circ + \theta / -45^\circ + \theta / 90^\circ + \theta]_{ns}$ необходимо признать моноклинной, которая при $n \geq 4$ с достаточной для инженерных расчетов точностью может рассматриваться как однородный ортотропный материал.

В третьей главе разработан двухэтапный метод численного моделирования статических жесткостных характеристик композитных упругих муфт, проведена оценка его достоверности, а также выполнены численные исследования влияния комбинированного нагружения на прочность конструкции упругой муфты.

Предложен двухэтапный метод определения статических жесткостных характеристик упругих муфт осевой C_L , сдвиговой C_R , изгибной C_B и крутильной C_T .

На первом этапе, на основе конечно-элементной (КЭ) модели, к которой поочередно приложены силовые и кинематические воздействия, вычисляются нелинейные статические нагрузочные характеристики упругих муфт $P_L = P_L(\Delta_L)$, $P_R = P_R(\Delta_R)$, $M = M(\psi)$, $M_T = M_T(\varphi)$. Для ряда значений линейных Δ_L , Δ_R и угловых ψ , φ смещений кромки свободной мембраны находятся значения проекций главных векторов и главных моментов реакций связей R_L , R_R , M , M_T на кромке заземленной мембраны, позволяющие построить нагрузочные характеристики. Полученные нагрузочные характеристики аппроксимируются гладкими функциями (рис. 2).

На втором этапе, дифференцируя найденные нагрузочные характеристики по соответствующим линейным и угловым перемещениям, находятся соотношения для определения осевой, радиальной, изгибной и крутильной жесткостей упругой муфты в виде: $C_L(\Delta_L) = dR_L(\Delta_L) / d\Delta_L$, $C_R(\Delta_R) = dR_R(\Delta_R) / d\Delta_R$, $C_B(\psi) = dM(\psi) / d\psi$, $C_T(\varphi) = dM_T(\varphi) / d\varphi$.

Достоверность предложенного метода подтверждена путем сопоставления указанных расчетных и экспериментальных величин. Для этого были разработаны и изготовлены три опытные конструкции сборной композитной упругой муфты.

При построении КЭ модели сборной упругой муфты восьмислойный квазиизотропный в плоскости армирования композит жестких наружных слоев трехслойных мембран моделировался послойно. Особо подчеркивается невозможность нахождения однозначно определенных расчетных нагрузочных характеристик $P_R = P_R(\Delta_R)$ и $M = M(\psi)$. Возможно предсказание только их верхней (sup) и нижней (inf) границ. В качестве основных причин, порождающих указанную неоднозначность, отмечается:

– малость числа повторяющихся пакетов слоев стеклопластика Т-10-14 / DION FR 9300 ($n = 1$), образующих слоистую структуру жестких наружных слоев мембран;

– случайный характер ориентации армирования жестких наружных слоев мембран относительно направлений задаваемых линейного Δ_R и углового ψ смещений.

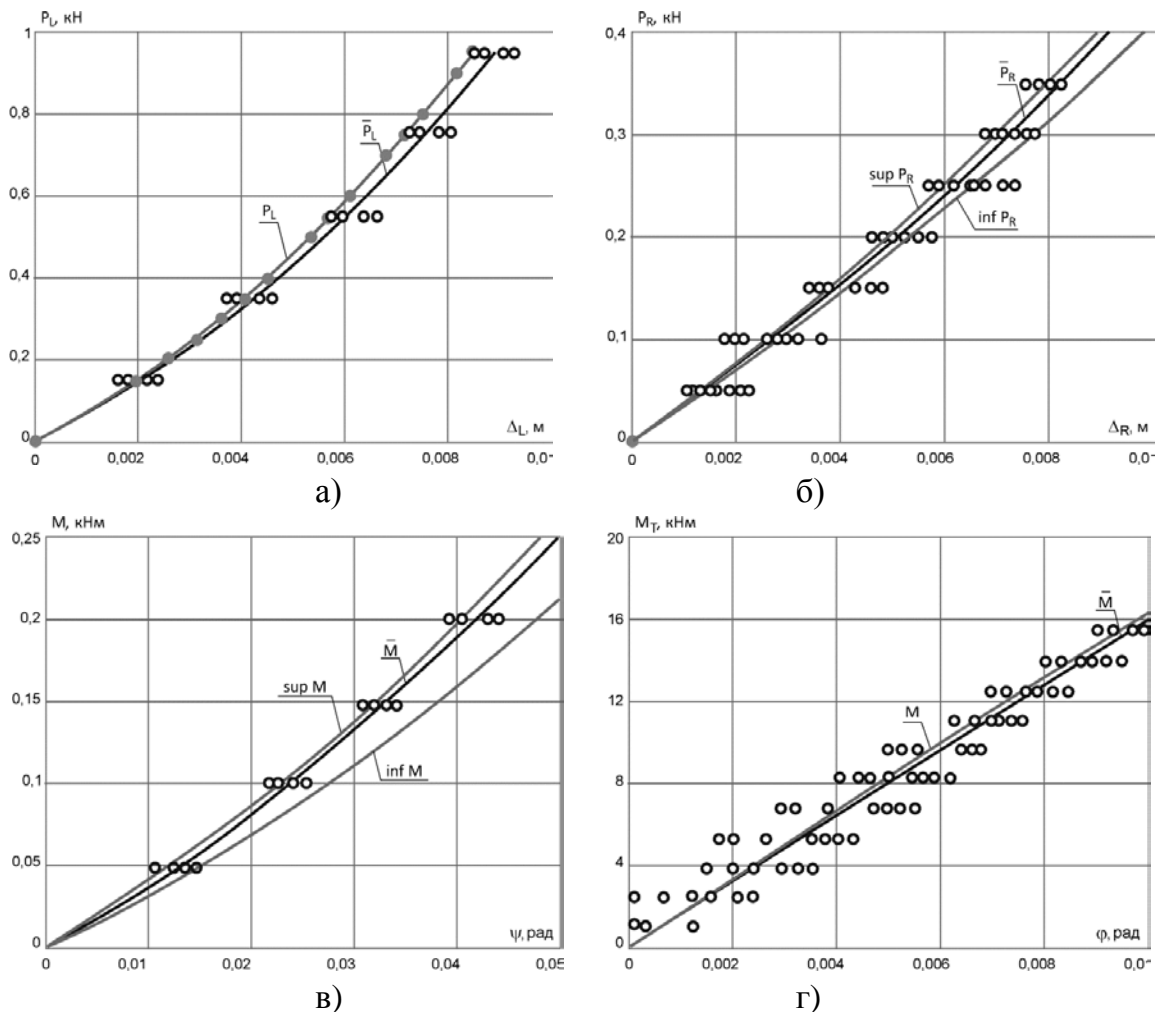


Рис. 2. Нагрузочные характеристики опытной конструкции сборной композитной упругой муфты при нагружении: а) осевой силой P_L , б) поперечной силой P_R , в) изгибающим моментом M , г) крутящим моментом M_T

Расчетные и экспериментальные нагрузочные характеристики приведены на рис. 2, где серым цветом обозначены данные, полученные в процессе расчета, а черным цветом – данные, полученные в процессе экспериментов. Сопоставление расчетных и экспериментальных нагрузочных характеристик позволяет отметить их хорошее согласование.

В конце третьей главы приведены результаты определения влияния комбинированного нагружения на прочность композитной упругой муфты. Рассматривались следующие сочетания комбинации нагрузок:

- 1) крутящий момент M_T , изгибающий момент M и осевое усилие N ;
- 2) крутящий момент M_T , поперечное усилие Q и осевое усилие N ;
- 3) крутящий момент M_T , изгибающий момент M и поперечное усилие Q .

Проведенные численные исследования влияния комбинированного нагружения на прочность композитной упругой муфты, позволили оценить влияние уровней осевых и радиальных усилий, а также изгибающего момента на величину предельного крутящего момента. Приведенные результаты позволяют установить предельные комбинации нагрузок, приложенных к упругой муфте, и, следовательно, обоснованно подходить к назначению ограничений при выборе режимов эксплуатации.

Четвертая глава содержит описание метода моделирования динамики композитных упругих муфт.

Изложен приближенный метод моделирования диссипативных характеристик композитных конструкций, основанный на исследовании их свободных затухающих колебаний. Показано, что использование принципа упруго-вязкоупругого соответствия в линейной теории вязкоупругости сводит задачу о свободных затухающих колебаниях к алгебраической проблеме комплексных собственных значений и каждая комплексная собственная частота связана с соответствующим комплексным собственным вектором соотношением Релея. Отмечено, что для прогнозирования диссипативных характеристик механических систем с малым демпфированием ($\eta_{\max} \leq 0,03$) широко используется энергетический метод.

Предложен новый вариант энергетического метода, позволяющий вычислять значения коэффициентов механических потерь композитных конструкций, используя возможности коммерческих программных комплексов:

$$\eta_k \approx \bar{\bar{\omega}}_k^2 / \bar{\omega}_k^2. \quad (1)$$

В соответствии с (1) для нахождения η_k достаточно определить собственные частоты и собственные формы колебаний двух конструкций одинаковой геометрии и массы. При формировании матрицы жесткости первой конструкции используются вещественные части комплексных модулей, а матрица жесткости второй конструкции формируется по мнимым частям комплексных модулей. Анализ собственных форм колебаний, полученных в результате решения двух задач на собственные значения, позволяет установить пары тождественных форм колебаний, которым соответствуют собственные частоты $\bar{\omega}_k$ и $\bar{\bar{\omega}}_k$, далее идентифицируемые как вещественные и мнимые части комплексных собственных частот.

Для прогнозирования диссипативных характеристик неоднородных конструкций, образованных слоями конструкционных композитов и слоями вязкоупругих материалов применяется комбинированный подход, заключающийся в поэтапном определении коэффициентов механических потерь составляющих элементов и системы в целом. На первом этапе вычисляются диссипативные характеристики несущих слоев в соответствии с алгоритмом, реализующим формулу (1). На втором этапе, используя полученные на первом этапе результаты в качестве осредненных упруго-диссипативных свойств материалов несущих слоев и экспериментально определенные температурно-частотные зависимости комплексных модулей вязкоупругих материалов, вычисляются диссипативные характеристики слоистой структуры в целом. Для этого средствами коммерческих программных комплексов находятся амплитудно-частотные характеристики установившихся вынужденных колебаний рассматриваемых диссипативных механических систем. Численное значение коэффициента механических потерь k -й моды колебаний вычисляется на отрезке $[f_{k1}, f_{k2}]$ по формуле

$$\eta_k = \Delta f / f_k = (f_{k2} - f_{k1}) / f_k, \quad (2)$$

где f_{k1} и f_{k2} – левая и правая абсциссы амплитудно-частотной характеристики, соответствующие ординатам $A = 0,707A_k$; A_k – амплитуда, соответствующая k -й собственной частоте f_k .

Оценка достоверности методов моделирования диссипативных характеристик выполнена путем сопоставления результатов, вычисленных по предложенным приближенным методам с опубликованными аналогичными результатами,

полученными при решении комплексной задачи на собственные значения и с результатами экспериментальных исследований. Совместный анализ всей совокупности результатов позволяет отметить хорошее соответствие, как между расчетными и экспериментальными значениями собственных частот и коэффициентов механических потерь, так и между расчетными значениями, полученными по различным математическим моделям.

Отмечено, что моделирование нестационарных колебаний композитной упругой муфты должно производиться на основе численного решения уравнений движения, в которых помимо переменных во времени внешних сил $\{F(t)\}$ должно учитываться влияние гироскопических моментов $[G]$ и неконсервативных позиционных сил $[B]$:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + ([G] + [D])\{\dot{u}(t)\} + ([B] + [C])\{u(t)\} = \{F(t)\}. \quad (3)$$

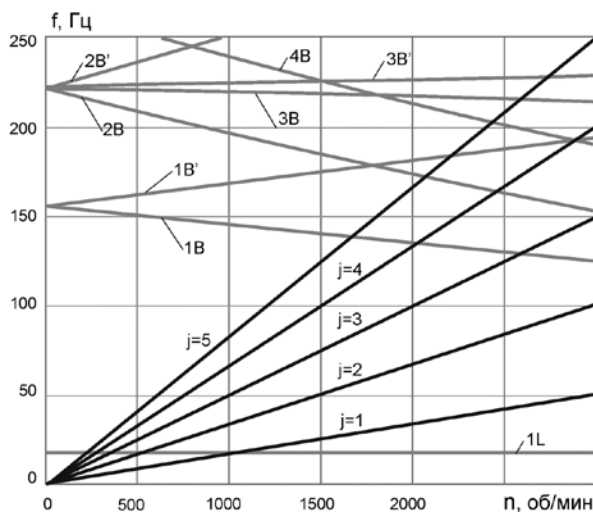


Рис. 3. Диаграмма Кэмпбелла для сборной композитной упругой муфты

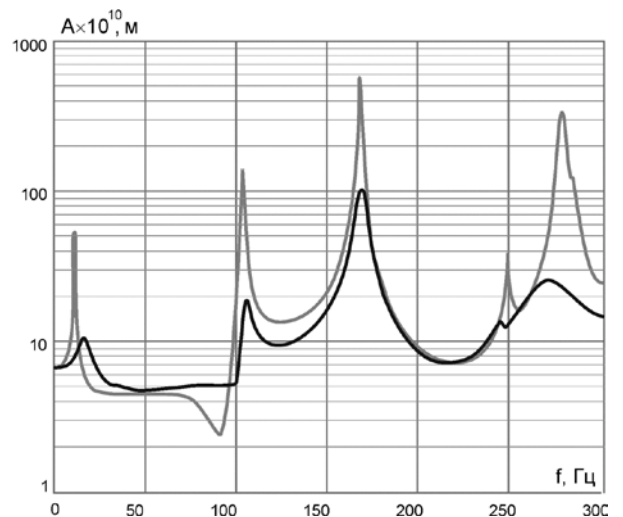


Рис. 4. АЧХ двух вариантов конструкции сборной упругой муфты, полученные в результате гармонического анализа

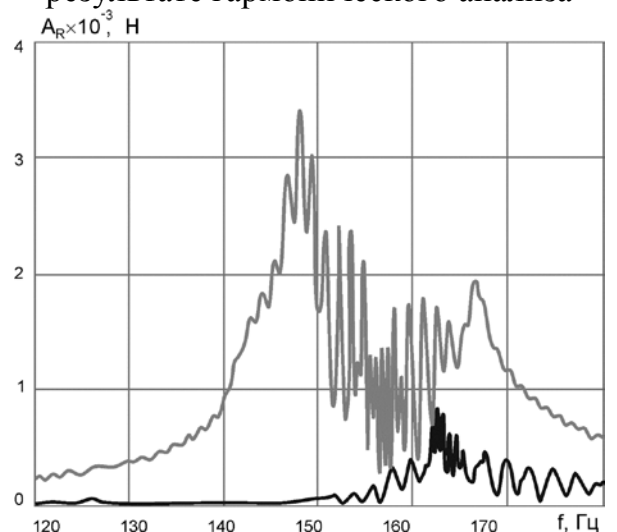
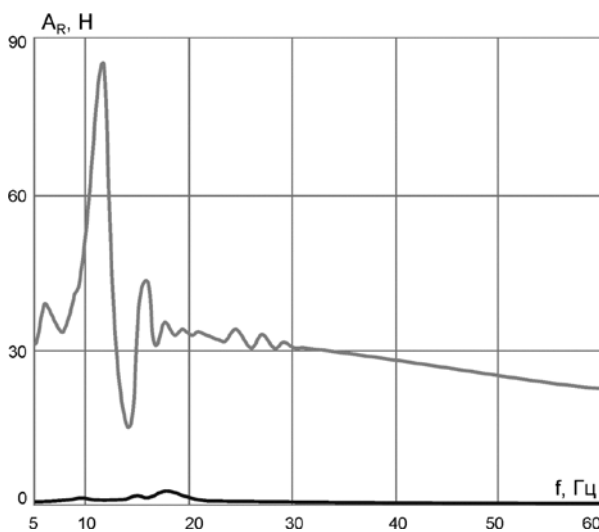


Рис. 5. АЧХ модулей главных векторов дополнительных динамических реакций в опорах валопровода двух вариантов конструкции сборной упругой муфты

Показано, что используемая в практике проектирования диаграмма Кэмпбелла позволяет установить запретные частотные диапазоны эксплуатации композитной упругой муфты (рис. 3). Однако эта диаграмма не позволяет оценить влияние демпфирования на величины резонансных амплитуд виброперемещений и дополнительных динамических реакций в опорах валопровода. В настоящей работе такая оценка получена на основе рассмотрения вынужденных колебаний а) не вращающейся и б) вращающейся композитных упругих муфт.

Численные исследования выполнены для двух вариантов конструкции композитной упругой муфты, отличающихся наличием или отсутствием слоя вязкоупругого полимера в составе мембран. Полученные результаты приведены в виде амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) виброперемещений (рис. 4) и модулей главных векторов дополнительных динамических реакций в опорах валопровода (рис. 5).

На рис. 4, рис. 5 черные и серые линии относятся к упругим муфтам с наличием и отсутствием слоя вязкоупругого полимера в составе мембран соответственно. Приведенные АЧХ однозначно свидетельствуют о целесообразности включения в состав конструкции мембран композитной упругой муфты слоя вязкоупругого полимера с целью значительного снижения амплитуд резонансных максимумов виброперемещений и модулей главных векторов дополнительных динамических реакций в опорах валопровода.

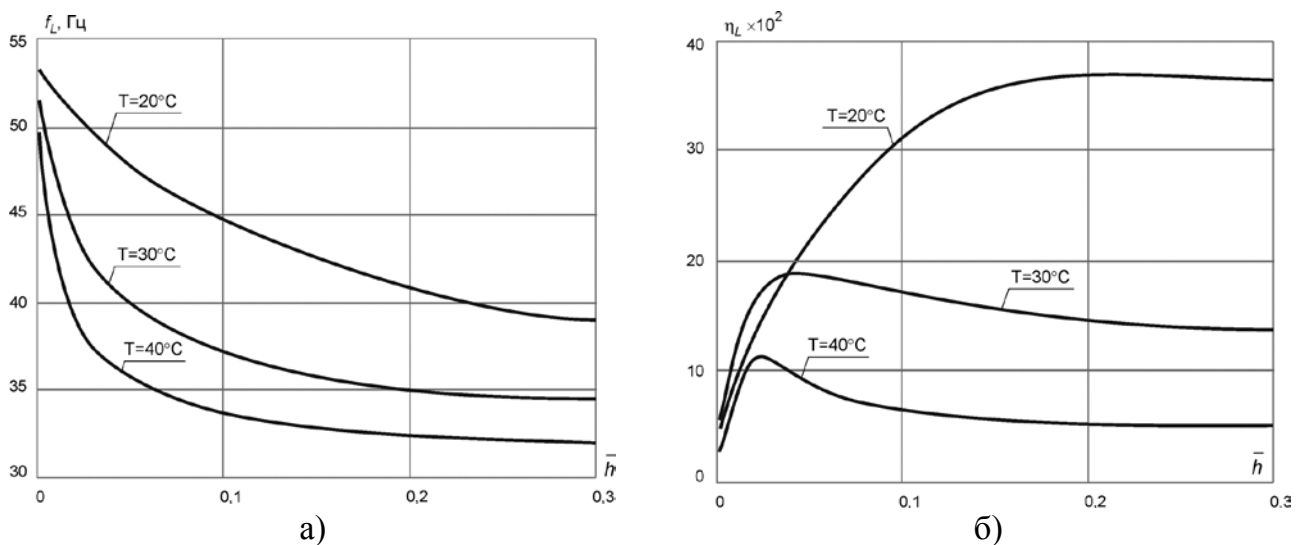


Рис. 6. Зависимости а) первых собственных частот и б) соответствующих им коэффициентов механических потерь осевых колебаний сборной упругой муфты от относительной толщины слоя мягкого вязкоупругого полимера

При исследовании влияния температуры среды эксплуатации и погрешностей изготовления на значения собственных частот и коэффициентов механических потерь композитной упругой муфты считалось, что в рассматриваемом диапазоне изменения температур влияние частоты колебаний и температуры окружающей среды на упруго-диссипативные характеристики стеклопластика пренебрежимо мало. В то же время температурно-частотная зависимость упруго-диссипативных характеристик вязкоупругого полимера учитывалась.

Результаты исследования влияния равномерного изменения относительной толщины среднего слоя вязкоупругого полимера трехслойной кольцевой мембраны $\bar{h} = h_2 / (h_1 + h_3)$ на значения первых собственных частот осевых f_{L1} (рис. 6) и крутильных f_{T1} мод колебаний сборной упругой муфты, а также соответствующих этим модам коэффициентов механических потерь η_{T1} , η_{L1} приводит к следующим выводам:

- повышение температуры среды эксплуатации T при $\bar{h} = \text{const}$ и повышение \bar{h} при $T = \text{const}$ влечет за собой понижение значений f_{T1} , f_{L1} и, следовательно, понижение соответствующих динамических жесткостей;

- для каждого значения T существует эффективная относительная толщина среднего слоя вязкоупругого полимера трехслойной кольцевой мембраны \bar{h} , дальнейшее увеличение которой не приводит к повышению диссипативных характеристик.

Одной из особенностей сборных композитных упругих муфт является возможность появления в процессе изготовления неравномерности распределения толщины слоя вязкоупругого полимера по поверхности трехслойной кольцевой мембраны, порождаемой некомпланарностью несущего и прикрывающего жестких слоев. В качестве меры этой некомпланарности используется угол взаимного отклонения плоскостей жестких слоев трехслойной кольцевой мембраны γ .

Выполненные численные исследования влияния указанных технологических отклонений на параметры динамического отклика упругой муфты позволили установить:

- симметрия углов отклонения трехслойных кольцевых мембран сопровождается приращением значений f_{T1} (до 20%), f_{L1} (до 12%) и η_{T1} (до 100%), η_{L1} (до 50%) по мере

увеличения угла $\gamma \in [-0,5^0; 0^0]$; при $\gamma \in [0^0; +0,5^0]$ нарастание модуля угла отклонения обеих образующих муфту трехслойных кольцевых мембран не влечет за собой существенных изменений рассматриваемых параметров динамического отклика;

– асимметрия углов отклонения обеих трехслойных кольцевых мембран сопровождается приращениями значений f_{T1} (до 11%), f_{L1} (до 15%) и η_{T1} (до 50%), η_{L1} (до 30%) по мере увеличения модуля угла $\gamma \in [-0,5^0; +0,5^0]$. Следствием этого является симметрия графиков зависимостей $\bar{f}_{T1} = \bar{f}_{T1}(\gamma)$, $\bar{f}_{L1} = \bar{f}_{L1}(\gamma)$, $\bar{\eta}_{T1} = \bar{\eta}_{T1}(\gamma)$, $\bar{\eta}_{L1} = \bar{\eta}_{L1}(\gamma)$ относительно начала координат;

– изменение температуры среды эксплуатации T влечет за собой изменение величин собственных частот первой крутильной и первой осевой мод колебаний и, следовательно, изменение соответствующих диссипативных характеристик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы:

1. Выполнен анализ существующих математических моделей упругих, диссипативных, прочностных характеристик слоев композита и слоистых композитных структур при различных условиях нагружения.

2. Разработана математическая модель прогнозирования эффективных прочностных характеристик симметричных слоистых композитных структур при изгибе/кручении.

3. Проведен сравнительный анализ значений эффективных упругих, диссипативных и прочностных характеристик симметричных слоистых композитов, найденных для условий одноосного растяжения/сжатия и сдвига в плоскости армирования и для условий изгиба/кручения. Получены количественные оценки влияния числа повторяющихся пакетов слоев на расхождения величин рассматриваемых эффективных характеристик, вычисленных при различных условиях нагружения. Показано, что:

- уравновешенный слоистый композит при числе повторяющихся пакетов слоев $n \geq 2$ можно приближенно считать ортотропным однородным материалом и прогнозировать его эффективные упругие, диссипативные и прочностные характеристики в условиях нагружения изгибом/кручением, используя значения

аналогичных характеристик, полученных при испытаниях образцов на одноосное растяжение/сжатие и изгиб в плоскости армирования.

- симметричный квазиизотропный в плоскости армирования слоистый композит, при одноосном растяжении/сжатии классифицируется как ортотропная структура. При изгибе/кручении этот композит необходимо признать моноклинной структурой. Показано, что при $n \geq 4$ с достаточной для инженерных расчетов точностью моделирование композитных конструкций может выполняться на основе использования эффективных упругих, диссипативных и прочностных характеристик определенных при растяжении, сжатии и сдвиге в плоскости армирования.

4. Разработан двухэтапный метод численного моделирования статических жесткостных характеристик композитных упругих муфт с учетом влияния структуры армирования и геометрической нелинейности. Оценка достоверности разработанного метода, выполненная путем сопоставления соответствующих расчетных и экспериментальных значений опытных конструкций, продемонстрировала их хорошее согласование.

5. Выполнены численные исследования влияния комбинированного нагружения на прочность композитной упругой муфты, позволившие оценить влияние уровней осевых и радиальных усилий, а также изгибающего момента на величину предельного крутящего момента.

6. Разработан приближенный метод численного моделирования диссипативных характеристик ортотропных композитных конструкций с малыми уровнями демпфирования ($\eta_{\max} = 0,03$), позволяющий использовать возможности существующих коммерческих программных комплексов без какой-либо их доработки. Достоверность метода подтверждена путем сопоставления вычисленных на его основе значений собственных частот и коэффициентов механических потерь с аналогичными опубликованными в научной литературе экспериментальными и расчетными величинами.

7. Разработан приближенный двухэтапный комбинированный метод определения диссипативных характеристик композитных структур, образованных несущими слоями из конструкционных композитов и слоями вязкоупругих полимеров, состоящий в поэтапном определении коэффициентов механических потерь составляющих элементов и системы в целом. Достоверность метода подтверждена путем сопоставления

расчетных и экспериментальных значений собственных частот и коэффициентов механических потерь.

8. Развѣт метод численного моделирования нестационарных колебаний композитной упругой муфты. Показано, что наиболее информативное моделирование параметров динамического отклика вращающейся композитной упругой муфты с высокими диссипативными характеристиками возможно только путем учета гироскопических моментов и неконсервативных позиционных сил в уравнениях движения механической системы.

9. Исследовано влияние температуры среды эксплуатации, относительной толщины слоя вязкоупругого полимера и технологических погрешностей на диссипативно-жесткостные характеристики сборной композитной упругой муфты.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях рекомендованных ВАК при Минобрнауки России

1. Дмитриева А. М., Лысенко А. П., Ярцев Б. А. Простейший подход к определению диссипативных характеристик ортотропных композитных тонкостенных стержней замкнутого профиля // Труды Центрального научно-исследовательского института имени академика А. Н. Крылова. 2012. Вып. 66 (350) С. 13-32.
2. Лысенко А. П., Ярцев Б. А. Упругие вибропоглощающие соединительные муфты из полимерных композиционных материалов. 1. Конструкции, нагрузки, материалы // Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. Вып. 75 (359) С 51-60.
3. Лысенко А. П., Ярцев Б. А. Упругие вибропоглощающие соединительные муфты из полимерных композиционных материалов. 2. Алгоритмы расчета упруго-диссипативных характеристик и прочности // Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. Вып. 76 (360). С 71-78.
4. Лысенко А. П., Ярцев Б. А. Упругие вибропоглощающие соединительные муфты из полимерных композиционных материалов. 3. Верификация алгоритмов расчета диссипативно-жесткостных характеристик и прочности // Труды Крыловского государственного научного центра. 2014. Вып. 83 (367). С 81-88.

5. Лысенко А. П. Упругие виброизолирующие соединительные муфты из полимерных композиционных материалов // Машиностроение и инженерное образование. 2015. № 2. С. 2-8.
6. Лысенко А. П. Сборная композитная упругая муфта с повышенным вибропоглощением // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 1 (379). С 56-63.
7. Лысенко А. П., Ярцев Б. А. Композитные упругие муфты // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Вып. 1 (383). С. 13-28.
8. Лысенко А. П., Паршина Л. В., Ярцев Б. А. Эффективные механические характеристики симметричного слоистого композита при различных условиях нагружения // Труды Крыловского государственного научного центра. 2022. Вып. 1 (399). С. 75-88.

В других изданиях:

9. Лысенко А. П. Композитные виброизолирующие соединительные муфты с высокими диссипативными свойствами // Труды 26 международной инновационно-ориентированной конференции молодых ученых и студентов ИМАШ РАН. Изд. ИМАШ РАН. 2015г. С. 122 – 126.
10. Lysenko A.P. Dynamics of composite vibration-absorbing Couplings // Proceedings of the 11th International Conference «Navy and Shipbuilding Nowadays NSN 2021» (June 24 – 25, 2021, St. Petersburg, Russia). // СПб.: Крыловский государственный научный центр. 2021. С. 223–229.

Патенты:

1. Патент RU 2530915 С2. Российская Федерация. Композитная виброизолирующая соединительная муфта. Звиздун А. М., Лысенко А. П., Ярцев Б. А. – Заявка № 2012135806/11: заявлено 21.08.2012; опубликовано 20.10.2014. Бюл. № 29. 4 с.
2. Патент RU 2530929 С2 Российская Федерация. Сборная композитная виброизолирующая соединительная муфта. Звиздун А. М., Лысенко А. П., Ярцев Б. А. – Заявка № 2012135805/11: заявлено 21.08.2012; опубликовано 20.10.2014. Бюл. № 29. 6 с.