

М 428754

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской
Революции и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н.Э.Баумана

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

на правах рукописи

ПОРТНОВ
ГЕОРГИЙ ГЕОРГИЕВИЧ

УДК 539.3; 678.06; 62.25

ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ
ТОЛСТОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ
ИЗ КОМПОЗИТОВ МЕТОДОМ НАМОТКИ

01.02.06. — Динамика, прочность машин, приборов и
аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

МОСКВА — 1985

Работа выполнена в Институте механики полимеров
АН Латвийской ССР

Официальные оппоненты:

д.т.н., профессор Бидерман В.Л.

д.т.н., профессор Перов Б.В.

член-корр. АН СССР, д.т.н., профессор Уржум-
цев Ю.С.

Ведущая организация указана в решении специали-
зированного совета Д 053.15.08

Защита диссертации состоится 11 апреля 1985 г.
на заседании специализированного совета Д 053.15.08 в
Московском высшем техническом училище им. Н.Э.Бау-
мана: г. Москва, 2-я Бауманская ул., дом 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Московского высшего технического училища им.
Н.Э.Баумана

5 февраля 1985 г.

занного
ук.

Дубинин В.В.

М 428754



1428754

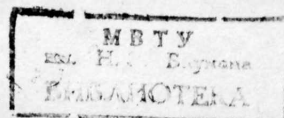
Портнов Г.Г. Прикладные зад

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Намотка — один из основных методов создания ответственных элементов конструкций в виде тел вращения из композитов с полимерной матрицей. Коренное отличие процесса намотки композитов от намотки традиционных материалов состоит в том, что она представляет собой способ переработки полуфабриката в монолитный материал. Управляя схемой армирования и усилием натяжения, можно целенаправленно влиять на прочность и жесткость материала, систему начальных напряжений, давление на обматываемую деталь. При этом конструкционные и технологические стороны создания получаемых изделий оказываются тесно связанными.

До недавнего времени изделия, образуемые методом намотки, были, в основном, тонкостенными. В последние годы возросло применение толстостенных высоконагруженных элементов конструкций, изготавливаемых намоткой. К ним относятся оболочки различного назначения, шпангоуты и корпуса глубоководных аппаратов, элементы теплозащиты, бандажы, несущие электроизолирующие элементы электрических машин и аппаратов и другие конструкции, работающие при осесимметричной или близкой к ней нагрузке. Использование композитов в таких конструкциях невозможно или неэффективно без нагружения этих материалов в заведомо слабых, поперечных армированию направлениях. Необходимо отметить, что для конструкций из композитов характеристика "толстостенности" определяется не только геометрией, но и параметрами анизотропии упругих и прочностных свойств материала, а также характером нагружения, что сдвигает традиционные границы толстостенности в сторону существенно меньших относительных толщин.

Для толстостенных изделий опыт, полученный при разработке методов расчета и изготовлении методом намотки тонкостенных конструкций, оказался недостаточным. Для толстостенных элементов в отличие от тонкостенных принципиально важным является анализ процесса намотки и превращения полуфабриката в готовое изделие. Практика показала, что с ростом толщины резко возрастает опасность появления дефектов в виде искривления армирующих слоев и межслойных трещин. Проблемы монолитности толстостенных изделий оказались тесно связанными с задачей об управлении начальными напряжениями. Такое управление наиболее эффективно осуществляется на



этапе намотки — за счет изменения усилия натяжения наматываемых витков. Характерной особенностью силовой намотки является значительное отличие натяжения в уже намотанных витках от первоначального усилия при намотке, что обусловлено низкой жесткостью полуфабриката в радиальном направлении. Поэтому для установления связи между силовым режимом намотки и напряжениями в готовом изделии необходим возможно более полный учет радиальных деформативных свойств композита в состоянии переработки.

Ряд толстостенных композитных конструкций эксплуатируется при давлениях, превышающих сто МПа. Эксперименты показали, что повышение несущей способности таких изделий путем увеличения толщины оказывается малоэффективным. При указанном уровне давления теоретический анализ уже нельзя ограничить рассмотрением лишь начального участка диаграммы деформирования материала в радиальном направлении поскольку деформативные свойства композитов при сжатии в нормальном к слоям направлении, в основном, определяются матрицей и диаграмма деформирования является существенно нелинейной. Это привело к необходимости постановки и решения задачи о напряженно-деформированном состоянии элементов толстостенных композитных изделий, работающих под давлением, с учетом физической нелинейности материалов.

Опыт, накопленный при исследовании толстостенных конструкций, оказался полезным при рассмотрении возможностей использования композитов в маховиках. Интерес к инерционным накопителям энергии — маховикам усилился в связи с возросшими потребностями техники в высокоэффективных аккумуляторах энергии, способных к формированию ее мощных импульсов. Композиты на основе высокопрочных волокон в качестве материалов для роторов маховиков обладают двумя основными преимуществами — высокой удельной прочностью при растяжении вдоль волокон и, при правильно спроектированной конструкции, относительно безопасным (безосколочным) характером разрушения. Однако уже первые попытки изготовления и испытания маховиков из композитов показали, что для достижения высокой энергоемкости необходимо, в первую очередь, преодолеть проблемы, связанные с низкой прочностью этих материалов при поперечном отрыве и сдвиге. Эти обстоятельства определяют актуальность исследований нового класса композитных изделий — маховиков, направленных на достижение максимальной энергоемкости путем подавления и

ограничения межслойных напряжений и оптимизации структуры материала.

Можно утверждать, что создание и применение толстостенных изделий и накопителей энергии из композитов вызвали необходимость решения класса задач механики композитов, связанных с технологией их изготовления, уточнением методов расчета традиционных элементов конструкций и разработкой методов расчета и проектирования по энергоемкости новых перспективных конструкций.

Целью настоящей работы является развитие методов расчета толстостенных конструкций, образованных намоткой композитов, направленных на повышение их несущей способности, энергоемкости, монолитности и совершенствование технологии их изготовления. Она включает анализ механики намотки композитов, создание расчетных методов управления на этапе намотки начальными напряжениями в элементах толстостенных изделий, разработку методов их расчета на действие высоких давлений, развитие специфических методов намотки толстостенных изделий (хордовой намотки), расчет и оптимизацию по энергоемкости композитных маховиков, их оценку и разработку перспективных для накопления энергии конструкций.

Научная новизна. Введены модели, позволившие при построении инженерной механики намотки учесть нелинейные свойства наматываемого полуфабриката. Разработаны расчетные методы управления на этапе намотки начальными напряжениями в готовом изделии. Предложен и оценен приближенный способ учета нелинейности радиальных свойств композитов при расчете элементов толстостенных изделий на действие высоких давлений. Разработаны методы расчета и проектирования вращающихся оболочек и дисков из композитов, направленные на достижение ими максимальной энергоемкости. Получены численные оценки предельных значений энергоемкости различных типов маховиков из композитов, построены методы расчета хордовых маховиков из композитов при равномерном вращении и ускорении, определены условия их равновесной намотки.

Специфика рассмотренных в работе задач состоит в изучении, описании и учете свойств композитов в направлении поперечном армированию на этапах изготовления, проектирования и эксплуатации рассмотренных классов конструкций. Отправной точкой для постановки большинства задач явились эксперименты, проведенные автором или под его руководством.

Достоверность полученных результатов обеспечивается оценкой погрешностей, вносимых используемыми допущениями; сопоставлением некоторых частных решений с известными в литературе и полученными другими методами; контролем точности при проведении вычислений на ЭВМ; сопоставлением расчетных результатов с экспериментальными.

Практическая значимость. Представленный анализ механики процесса намотки и разработанные расчетные методы программирования намотки и намотки с послойным отверждением позволили за счет управления напряженным состоянием толстостенных изделий повысить их монолитность и прочность, уточнить расчет оправок и повысить качество составных предварительно напряженных конструкций, усиленных намоткой композитов. Разработаны мероприятия по повышению прочности и монолитности элементов толстостенных изделий, нагруженных высокими давлениями, связанные с увеличением радиальной жесткости и прочности таких изделий за счет некоторого ухудшения их свойств в окружном направлении (использование осевого и радиального армирования). Проведенный анализ энергоемкости работающих композитных дисков и оболочек привел к разработке перспективной конструкции накопителя энергии из композита - хордового маховика и позволил создать образцы маховиков такого типа. Полученные условия равновесности хордовой намотки использованы в качестве основы при проектировании соответствующего намоточного оборудования.

Все проведенные в работе исследования выполнены по хозяйственным договорам или договорам о содружестве с предприятиями различных отраслей народного хозяйства страны. Полученные результаты использованы в электромашиностроении при бандажировании обмоток двигателей и изготовлении коллекторов электрических машин, при проектировании и изготовлении глубоководных аппаратов и импульсных источников энергии. От внедрения результатов работы получен существенный экономический эффект, подтвержденный актами о внедрении.

Разработанные методы исследования прочности и режима намотки элементов толстостенных композитных изделий используются в учебном процессе и приведены в двух изданиях книги "Практикум по технологии переработки пластических масс" М.:Химия (1973,

1980). Возможности использования композитов в маховиках стражаны в обзоре "Маховики из композитов", М., 1982. - 148 с.

Апробация работы. Основные результаты, представленные в диссертации, докладывались на

IV и V Всесоюзных съездах по теоретической и прикладной механике (Киев, 1976; Алма-Ата, 1981); I, II, III Всесоюзных конференциях по механике полимеров (Рига, 1965, 1971, 1976); IV, V Всесоюзных конференциях по механике полимерных и композитных материалов (Рига, 1980, 1983); IV Всесоюзной конференции по прочности и пластичности (Москва, 1967); IV Всесоюзной конференции по композиционным материалам (Москва, 1978); Всесоюзном симпозиуме по механике конструкций из композиционных материалов (Киев, 1979); международной конференции "Армированные пластики - 76" (ГДР, Дрезден, 1976); Международной конференции по композиционным материалам (Женева-Бостон, 1975) и ряде всесоюзных отраслевых конференциях и совещаний.

Диссертационная работа в целом обсуждена на Семинаре научного совета АН СССР по механике конструкций из композиционных материалов (Москва, 1984).

Публикации. Исследованиям по рассматриваемым проблемам посвящено 49 научных работ автора. В автореферате приведен список 22 работ, отражающих основное содержание диссертации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из семи глав и выводов. Общий объем работы 424 страницы, в том числе 260 страниц текста, 125 рисунков, 16 таблиц. Список цитированной литературы содержит 312 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава содержит обзор исследований по рассматриваемым проблемам и описание работы в целом.

Механика композитов является в настоящее время сложившимся направлением в механике деформируемого твердого тела, становлению и развитию которого способствовали работы Н.А.Албуртова, С.А.Амбарцумяна, В.Д.Бидермана, В.В.Болотина, Г.А.Вачина, В.В.Васильева, И.И.Гольденבלата, Г.М.Гуняева, С.Г.Лехницкого, А.И.Малмистера, М.В.Некировского, В.Д.Протасова, Ю.Н.Работнова, А.М.Скудры, В.С.Стрелева, В.П.Тамуша, Г.А.Тетерса, В.Т.Томашевского,

С.Б.Черевацкого, Е.Ву, К.Гераковича, Р.Кристенсена, Э.Хашина, С.Цая и других советских и зарубежных ученых.

В главе представлен подробный анализ работ, непосредственно связанных с темой диссертации. Основное внимание уделено инженерной механике намотки композитов. Начало исследований, связанных с процессом намотки, восходит к работам А.В.Гадолина и Н.Ф. Дроздова по усилению стволов артиллерийских орудий. Бандажирование проводкой цилиндров было рассмотрено Р.В.Саусвеллом; Б.С. Ковальский и С.В.Кожин исследовали давление, создаваемое на барабан грузоподъемного устройства навивкой каната. Учет прогиба образующей барабана на величину натяжения в намотанных витках был осуществлен В.Л.Бидерманом. Вопросы бандажирования с помощью композитов впервые были рассмотрены в работах автора и Р.Э.Бривманиса. Следует отметить, что во всех перечисленных работах, а также в исследованиях других авторов, за исключением работы М.Д.Очана, посвященной намотке нелинейно-упругой металлической ленты, рассматривалась намотка линейно-упругих материалов. Использование результатов этих работ при анализе намотки композитов затруднено не только усложнением свойств наматываемых материалов, но и значительным расширением круга задач. Намотка перестает быть самостоятельной операцией и превращается в этап многостадийного технологического процесса изготовления монолитного изделия.

Исследования процесса изготовления намоткой изделий из композитов проводились В.Л.Бидерманом, В.В.Болотиным и его школой, В.С.Екельчиком, Н.С.Ениколоповым, В.Д.Протасовым, В.Т.Томашевским, Р.А.Турусовым и Б.А.Розенбергом. В этих работах процесс изготовления изделия делился на этапы, для каждого из которых выбирается своя модель для описания свойств материала. На основе такого подхода разработаны инженерные методы определения напряжений на протяжении всего процесса формования изделия, основанные на линейных моделях материала и гипотезе о наследовании напряженного состояния от этапа к этапу, а также уточненные способы анализа напряженного состояния на отдельных этапах. Следует отметить, что эти уточнения были связаны с этапами термообработки изделия и не затрагивали первого технологического этапа — процесса намотки.

Несмотря на относительную полноту разработки теорий формования наматываемых изделий, они до последнего времени практически

не использовались для решения обратных задач — нахождения технологических режимов процесса намотки, обеспечивающих заданное напряженное состояние в готовом изделии. Возможности экспериментально апробированных методов управления на этапе намотки начальными напряжениями теоретически не анализировались, не определялись области их целесообразного применения. Регулировать начальные напряжения пытались, в основном, лишь путем изменения температурных режимов полимеризации и охлаждения изделий. Все эти обстоятельства привели к необходимости разработки уточненных методов механики намотки и использованию их для создания способов управления начальными напряжениями в намотанном изделии за счет силового режима его изготовления. Обзор работ по намотке приводит к выводу, что инженерная теория намотки должна основываться на простых, по возможности, моделях, области и условия применения которых должны строго определяться. Расчет напряженного состояния намоточного изделия из композита является, в основном, не самоцелью, а средством для оценки, разработки и сравнения эффективности различных технологических приемов, повышающих качество изделия, а также определения областей их целесообразного применения.

На основе анализа экспериментальных данных, обосновано использование в работе нелинейно-упругих моделей для описания свойств полуфабриката и отвержденного композита при активном нагружении сжатием поперек слоев и линейно-упругой модели при растяжении в этом направлении. Проведено сравнение подходов, используемых для описания нелинейно-упругих анизотропных свойств в работах Ю.Н.Работнова, В.А.Ломакина, В.П.Тамужа. Проанализированы работы, связанные с расчетом рассматриваемых типов конструкций. Показано, что во многих случаях увеличение толщины изделий, работающих при высоких давлениях является малоэффективным. Обоснована целесообразность расчета их напряженного состояния с позиций нелинейной теории упругости анизотропного тела.

Проблемы, связанные с созданием маховиков исследовались Н.В.Гуля, Ю.М.Очаном, С.Б.Черевачки, Д.Р.Рабенхорстом, Р.Постом, С.Кирком и др. Большое количество задач, возникающих при проектировании, испытаниях и использовании механических накопителей энергии, описаны в трудах трех американских симпозиумов

(1975, 1977, 1980 годы); по этим работам опубликован детальный обзор, вынесенный за пределы работы. Потенциально композиты являются наиболее перспективными материалами для маховиков. Однако, практически достигнутая энергоемкость еще далека от потенциальных возможностей композитов из-за преждевременного разрушения этих материалов от поперечного отрыва. Систематическое исследование различных возможностей использования композитов в маховиках с учетом их слабого сопротивления поперечному отрыву отсутствует. Проведение такого исследования, приводящего к разработке эффективной и работоспособной конструкции маховика из композита, представляется весьма важным шагом в решении проблемы создания инерционного аккумулятора энергии.

Первая глава заканчивается формулировкой целей исследования и характеристикой работы в целом.

Вторая глава посвящена анализу силового режима намотки композитов. Для описания процесса намотки необходимо знание деформативных свойств полуфабриката. Свойства вдоль наматываемой ленты или жгута определяются свойствами арматуры. При использовании жесткой арматуры и сохранении предварительного натяжения в процессе переработки зависимость между напряжением и деформацией при нагружении вдоль волокон с достаточной точностью описывается законом Гука. Деформативные свойства полуфабриката при сжатии поперек волокон на этапе намотки характеризуются высокой податливостью: $(4 \leq \beta \leq 200, \beta = \sqrt{E_1/E_2})$, где E_1 - модуль Юнга вдоль волокон, E_2 - касательный модуль Юнга при поперечном сжатии слоев полуфабриката) и существенной нелинейностью. Экспериментальные исследования изосхрон, кривых обратной ползучести и повторных нагружений в этом направлении показали, что основной вклад в нелинейность вносит уплотнение слоев, которое можно учесть в рамках нелинейной теории упругости.

Для анализа процесса намотки выделен элемент толстостенного изделия, имеющий форму кольца (цилиндра) и находящийся в условиях плоского напряженно-деформированного состояния. Спиральная структура заменена концентрически-кольцевой и процесс намотки схематизирован последовательным одеванием с натягом кольцевых слоев вначале на оправку, а затем друг на друга. Падение натяжения в намотанных слоях происходит в результате радиальных пе-

перемещений полуфабриката. Напряженное состояние системы из колец можно исследовать в рамках дискретной модели, описываемой системой $5j+1$ уравнений для определения приращений напряжений и деформаций в слоях и перемещений на их контактных поверхностях. Последовательным увеличением числа слоев, решением систем уравнений возрастающего порядка и суммированием приращений, получающихся на каждом шаге, удастся проследить за развитием напряженного состояния в наматываемом изделии. Эта модель обобщает различные подходы к описанию намотки линейно-упругих материалов, отмеченные в обзоре литературы.

Изложенный дискретный подход можно представить и как разностный аналог дифференциальной постановки задачи. В таком виде она становится частным случаем задачи о напряженно-деформированном состоянии растущего тела с заданным напряженным состоянием на границе. Рассмотрение намотки с позиций модели растущего тела осуществлено совместно с В.К.Тринчером. Разрешающие уравнения включают в себя помимо уравнений равновесия и состояния, соотношения Коши относительно производных деформаций и перемещений по параметру роста R (где R — растущий наружный радиус кольца). Последнее обстоятельство является характерной особенностью задачи. Физическая сторона проблемы заключается в том, что перемещения каждого из колец начинаются не одновременно и отсчитываются с момента одевания его на нижележащие, уже деформированные кольца. Ситуация аналогична рассмотрению процесса деформирования тела с начальными напряжениями, когда в уравнения системы, определяющие процесс, входят деформации и перемещения дополнительные к начальным. В данном случае вместе с непрерывным ростом кольца за счет предварительно напряженных элементов происходит непрерывное изменение начального (по отношению к дальнейшему росту кольца) напряженно-деформированного состояния. Эта особенность соотношений Коши в рассматриваемой задаче делает целесообразным и в остальных уравнениях переход к дифференцированию по растущему радиусу R . Для намотки анизотропного линейно-упругого тела с уравнениями связи $\epsilon_r = H_r(e_r, e_\theta)$; $\epsilon_\theta = H_\theta(e_r, e_\theta)$ получена система разрешающих уравнений

$$r \frac{\partial \dot{\epsilon}_r}{\partial r} + \dot{\epsilon}_r - \dot{\epsilon}_\theta = 0,$$

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}_r &= \frac{\partial H_r(\epsilon_r, \epsilon_\theta)}{\partial \epsilon_r} \dot{\epsilon}_r + \frac{\partial H_r(\epsilon_r, \epsilon_\theta)}{\partial \epsilon_\theta} \dot{\epsilon}_\theta, \\ \dot{\epsilon}_\theta &= \frac{\partial H_\theta(\epsilon_r, \epsilon_\theta)}{\partial \epsilon_r} \dot{\epsilon}_r + \frac{\partial H_\theta(\epsilon_r, \epsilon_\theta)}{\partial \epsilon_\theta} \dot{\epsilon}_\theta, \\ \dot{\epsilon}_r &= \frac{\partial \dot{u}}{\partial r}, \quad \dot{\epsilon}_\theta = \frac{1}{r} \dot{u},\end{aligned}\quad (I)$$

где r - текущий радиус; u - радиальные перемещения; точкой обозначено дифференцирование по наружному радиусу.

На растущей границе помимо заданного натяжения $\epsilon_\theta^0(R)$ может действовать и давление $\epsilon_r^0(R)$, создаваемое, например, опрессовкой наматываемого изделия лентой или большим числом прижимных валиков. Системе уравнений (I) при заданной податливости оправки λ и напряжениях на растущей границе $\epsilon_r(R, R) = \epsilon_r^0(R)$; $\epsilon_\theta(R, R) = \epsilon_\theta^0(R)$ соответствуют граничные условия

$$\begin{aligned}\lambda \dot{\epsilon}_r(r_0, R) - \dot{u}(r_0, R) &= 0, \\ \dot{\epsilon}_r(r, R)|_{r=R} &= \frac{d\epsilon_r^0(R)}{dR} + \frac{\epsilon_r^0(R) - \epsilon_\theta^0(R)}{R},\end{aligned}\quad (2)$$

где r_0 - наружный радиус оправки.

Напряжения, деформации и перемещения в намотанном кольце получатся интегрированием соответствующих скоростей. В рамках обеих моделей учет более сложных свойств наматываемого материала не связан с принципиальными трудностями. Наиболее естественно он осуществляется в непрерывной модели процесса намотки.

Далее оценены возможные погрешности предложенных подходов, в основе которых лежат кольцевая модель, исключающая из рассмотрения вопросы, связанные со спиральным характером расположения реальных витков, и гипотеза о малости деформаций. Анализ показал, что проскальзыванием витков и возмущением напряженного состояния вблизи концов наматываемой ленты при описании намотки композитов можно пренебречь. Поскольку радиальные деформации, связанные с уплотнением полуфабриката композита, могут достигать десятков процентов, то в принципе может потребоваться отказ от гипотезы о малости деформаций. Проведенные с учетом конечности радиальных деформаций расчеты показали, что изменением геометрических характеристик в процессе намотки композитов

можно пренебречь, особенно при переходе от напряжений к усилиям в слоях и использовании в качестве независимой переменной порядкового номера слоя.

Оба подхода были использованы при анализе процесса намотки нелинейно-упругого полуфабриката с законами деформирования в виде $\sigma_r = E_r \epsilon_r - \beta_r \epsilon_r^2$; $\sigma_\theta = E_\theta \epsilon_\theta$. Принятые значения констант: $E_\theta = 5 \cdot 10^4$ МПа; $E_r = 4$ МПа; $\beta_r = 25 \pm 200$ МПа - характерны для стеклопластиков в состоянии переработки. Определение напряженного состояния по дискретной и непрерывной моделям с использованием различных конечно-разностных схем приводит к близким результатам. Анализ, проведенный для случая намотки с постоянным натяжением $\sigma_\theta = \text{const}$, подтвердил экспериментально обнаруженные факты - зависимость относительного давления на оправку от натяжения и уменьшение возможности искривления слоев с ростом натяжения, которые не удавалось объяснить при линейно-упругой модели наматываемого материала. Результаты расчетных и экспериментально определенных значений давления при намотке стеклоленты ЛСВ-В на тензометрическую оправку, представленные на рис. 1, свидетельствуют о работоспособности предложенных методов расчета.

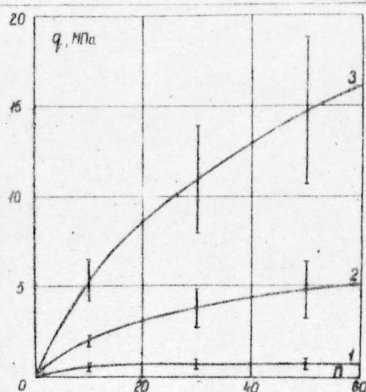


Рис. 1. Зависимость давления на оправку q от числа витков n : (расчетные кривые и диапазоны разброса экспериментальных данных); радиус оправки 0,075 м, толщина стеклоленты 0,0002 м; усилие натяжения: 1 - 375 Н/м; 2 - 940 Н/м; 3 - 2340 Н/м

При численном анализе введена кусочно-линейная аппроксимация кривой деформирования и определены условия, при которых возможен переход к более простым линейным моделям, допускающим аналитическое решение. Для линейных моделей определена оценка сверху для предельного давления q_{∞} , создаваемого намоткой существенно анизотропного материала ($\beta = \sqrt{E_{\theta}/E_r} \gg 1$) с постоянным натяжением на жесткую оправку

$$\frac{q_{\infty}}{E_{\theta}^0} = \frac{\pi}{2\beta} + \frac{2}{\beta(\beta-1)} \quad (3)$$

и установлено число витков, при достижении которого давление на обматываемую деталь практически перестает нарастать. Исследования давления на обматываемую деталь позволили разработать рекомендации по рациональному проектированию оправок и конструкций с предварительным натягом.

Полученные результаты выявили области сочетаний относительных толщин, деформативных характеристик полуфабрикатов и усилий натяжения, при которых возможно появление искривлений в слоях, а также дали возможность оценить эффективность мер, связанных с повышением жесткости полуфабриката в радиальном направлении.

Разработанные модели позволили перейти к вопросам управления напряженным состоянием изделия путем программирования натяжения на этапе намотки, которые рассмотрены в третьей главе. Для расчета программы предложено, задавшись напряжениями в готовом изделии, переходить от напряжений в конце каждого этапа формования к соответствующим им напряжениям в начале этого этапа (или в конце предыдущего), т.е. проходить весь процесс формования изделия в обратном направлении.

Задача определения силового режима намотки $\bar{b}_{\theta}^0(R)$, $\bar{b}_r^0(R)$, обеспечивающего после ее окончания требуемое распределение напряжений $\bar{b}_r^H$, $\bar{b}_{\theta}^H$, рассмотрена как обратная задача о намотке. Если задано напряженное состояние в намотанных витках, то реализующий его режим можно восстановить, снимая виток за витком и определяя соответствующее этому процессу изменение заданного напряженного состояния. Напряжения в последнем (на каждом этапе) витке и определяют искомый режим намотки данного витка. При предложенном подходе в дискретной модели сохраняется вся систе-

ма уравнений прямой задачи и граничное условие на внутреннем радиусе. Отличие состоит в изменении граничного условия на внешнем радиусе и в том, что число уравнений в разрешающей системе начинается с $5j+1$ и уменьшается в соответствии с уменьшением j в процессе решения задачи.

С позиций непрерывной модели растущего тела система исходных уравнений (I) решается при следующем граничном условии на уменьшающемся внешнем радиусе

$$\dot{\epsilon}_r(r, R)|_{r=R} = - \frac{d\epsilon_r^0(R)}{dR} - \frac{[\epsilon_r^0(R) - \epsilon_\theta^0(R)]}{R} \quad (4)$$

При $R=R_H$ силовые параметры намотки выражаются через заданные напряжения $\epsilon_\theta^0(R_H) = \epsilon_\theta^H(R_H)$, $\epsilon_r^0(R_H) = \epsilon_r^H(R_H)$. Варьируя $\epsilon_r^0(R)$ или $\epsilon_\theta^0(R)$, можно получать сочетания различных программ $\epsilon_r^0(R)$, $\epsilon_\theta^0(R)$, соответствующих заданным после окончания намотки напряжениям

$$\epsilon_{r,\theta}^0(r=R) = \epsilon_{r,\theta}^H(r, R_H) + \int_{R_H}^r \frac{\partial \epsilon_{r,\theta}(r, \bar{R})}{\partial \bar{R}} d\bar{R} \quad (5)$$

Принято, что полуфабрикат является физически нелинейным как в состоянии намотки, так и после разогрева и описывается зависимостями $e_r^H = F_r^H(\epsilon_r^H)$, $e_r^P = F_r^P(\epsilon_r)$, $\epsilon_\theta^{H,P} = F_\theta e_\theta^{H,P}$. При рассмотрении перехода от напряжений после разогрева ($\epsilon_\theta^P, \epsilon_r^P$) к напряжениям до разогрева (после окончания намотки) полуфабриката ($\epsilon_\theta^H, \epsilon_r^H$) обобщен способ, предложенный В.Д. Бидерманом для решения прямой задачи о напряженном состоянии в намотанных витках после разогрева линейно-упругого материала. Разогрев полуфабриката трактуется как изменение его радиальных свойств; окружные свойства, определяемые модулем упругости арматуры, считаются при этом неизменными. Оказалось, что температурными напряжениями, возникающими при разогреве, можно пренебречь из-за большой радиальной податливости полуфабриката.

На основании того, что для разностей $(e_{r,\theta}^H - e_{r,\theta}^P)$ выполняется условие совместности деформаций, получено уравнение, свя-

зывает напряжение в конце и начале этапа разогрева

$$\frac{d^2}{dr^2} [r(\sigma_\theta^P - \sigma_\theta^H)] = E_\theta \left[\frac{(\sigma_\theta^P - \sigma_r^P)}{r} \frac{dF_r^P}{d\sigma_r^P} - \frac{(\sigma_\theta^H - \sigma_r^H)}{r} \frac{dF_r^H}{d\sigma_r^H} \right]. \quad (6)$$

Граничные условия для рассмотренного в работе случая намотки на жесткую оправку без дополнительного внешнего давления имеют вид

$$\frac{d}{dr} [r(\sigma_\theta^P - \sigma_\theta^H)] = 0, \quad r = R_H, \\ \sigma_\theta^P - \sigma_\theta^H = 0, \quad r = r_0, \quad (7)$$

где R_H, r_0 - наружный и внутренний радиусы намотанного кольца.

При реализации обратного перехода на этапах, связанных с термообработкой, охлаждением и снятием изделия с оправки, применен предложенный В.В.Болотинным подход, основанный на гипотезах о линейной упругости отвержденного материала и отсутствии изменений в напряженном состоянии изделия при отверждении в условиях постоянной температуры. В этом случае напряжения после разогрева ($\sigma_r^P, \sigma_\theta^P$) должны равняться разности между заданными напряжениями в готовом изделии и напряжениями, возникающими при охлаждении изделия и снятии его с оправки. В результате определения описанными выше способами $\sigma_{r,\theta}^H$ и $\sigma_{r,\theta}^0$, получено решение задачи.

Для линейно-упругого полуфабриката программы силовой намотки представлены в аналитическом виде и конкретизированы для случаев, когда после разогрева требуется получить равномерное натяжение витков ($\sigma_\theta^P = \text{const}$) и когда в охлажденном и снятом с оправки изделии не должно быть начальных напряжений.

Более общий случай проиллюстрирован расчетом программы изменения усилия натяжения, обеспечивающей отсутствие акальных напряжений в кольце из стеклопластика, полуфабрикат которого обладает нелинейными свойствами: $e_r^{P,H} = F_r^{P,H}(\sigma_r) = \frac{A_{r,H} + B_{r,H}|\sigma_r|}{1 + C_{r,H}|\sigma_r|} \sigma_r$, $e_\theta^{P,H} = A_\theta \sigma_\theta$.

Уравнение (6) решалось методом последовательных приближений;

при определении программы изменения усилия натяжения использовались преобразованные программы для решения прямой задачи.

Результаты экспериментального определения начальных напряжений в кольцах из стеклоткани со связующим ПЭ-933, намотанных с постоянным натяжением и по программам, качественно совпадающими с расчетными, представлены на рис. 2. Видно, что управляя усилием натяжения при намотке по разработанным программам в определенном диапазоне относительных толщин, можно получать изделия практически без начальных напряжений.

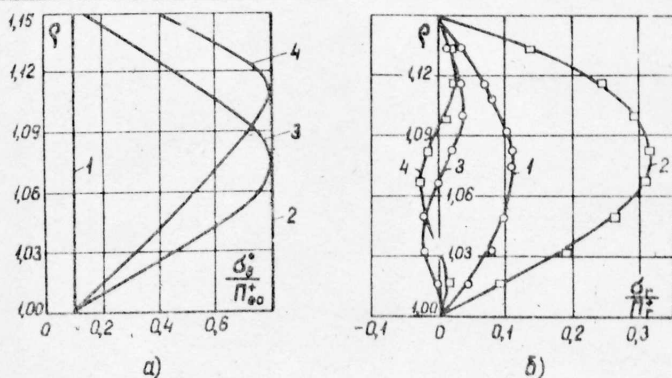


Рис. 2. Начальные радиальные напряжения в кольцах, намотанных с постоянным натяжением (1, 2) и по программам, качественно совпадающим с расчетными (3, 4): а - программы изменения напряжения (σ_g) в стеклотенте при намотке; б - начальные радиальные напряжения в кольцах. ($P_{\sigma 0}$ - прочность на растяжение полуфабриката; P_r - прочность стеклопластика на поперечный отрыв; ρ - относительный радиус)

При значительных относительных толщинах способ управления начальными напряжениями при помощи программированной намотки изделия за один прием может оказаться неэффективным из-за необходимости в слишком больших усилиях натяжения, превышающих прочность наматываемого композита. Поэтому предложено сочетать программированную намотку с послойным отверждением изделия, расширяющим ее возможности и уменьшающим величину необходимого натяжения из-за большей жесткости намотанных слоев. Полученное в линейной постановке решение позволяет определить закон изменения натяжения при намотке последовательно отверждающихся коль-

цевых слоев, обеспечивающий требуемые напряжения в готовом изделии, и проследить за уменьшением максимальной величины натяжения при уменьшении толщины слоев. Приведенные на рис. 3 результаты экспериментального определения начальных напряжений в кольцах из стеклопластика ЛСБ-Б, намотанных с послойным отверждением по программам, качественно подобным расчетным, подтвердили эффективность этого технологического приема – в кольце удалось не только избежать трещин, но и создать сжимающие радиальные напряжения.

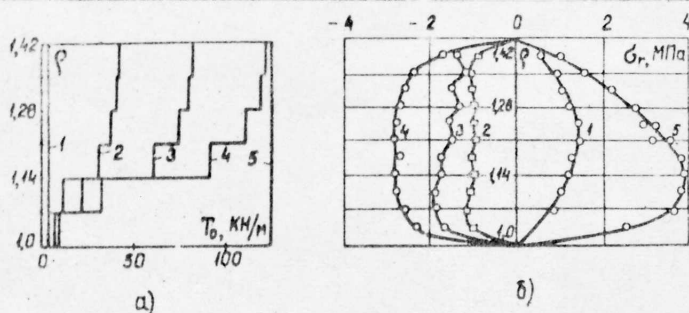


Рис. 3. Начальные напряжения в кольцах, намотанных с послойным отверждением по программам (1+б): T_0 – усилие в наматываемой ленте, ρ – относительный радиус

Использование полученных результатов позволило расширить диапазон толщин наматываемых изделий из композитов, изготавливаемых без искривлений слоев и окружных трещин. Разработанные расчетные методы управления начальными напряжениями использованы при решении родственных задач о намотке магнитных лент, бумаги, лакированных лент, в которых отсутствие искривлений слоев является одним из основных требований, предъявляемых к качеству изделия.

В четвертой главе осуществлена теоретическая и экспериментальная оценка степени влияния нелинейности радиальных свойств в композитных кольцах и цилиндрах на их напряженное состояние при больших давлениях. В связи с тем, что в настоящее время существуют ряд подходов к описанию нелинейно-упругих свойств анизотропных материалов, представлялось целесообразным провести сравнение различных моделей на основе одних и тех же эксперимен-

тальных данных. Были рассмотрены вариант тензорно-нелинейной связи

$$\epsilon_i = a_{ij} \cdot b_j + a_{ijkl} \cdot b_j \cdot b_k \cdot b_l \quad (8)$$

и три варианта тензорно-линейной связи типа

$$\epsilon_i = a_{ij} \cdot b_j + q_{ij} \cdot S^{n-1} \cdot X^{n-1}, \quad (9)$$

$$X^2 = \frac{1}{2} (a_{11} + a_{22}), \quad S^2 = \frac{1}{2} q_{kl} \cdot b_k \cdot b_l.$$

В результате сравнительного анализа был выбран тензорно-линейный способ описания деформативных свойств (при $n = 3$), обладающий при удовлетворительной точности большей простотой. С его помощью были описаны деформативные характеристики четырех однонаправленных стеклопластиков, отличающихся свойствами связующих. Диапазон изменения деформативных свойств рассмотренных материалов в поперечном армировании направлении был достаточно широким и охватывал экспериментальные данные, полученные и на других композитах. Диаграммы деформирования в направлении армирования были линейными и отличались мало. Для этих композитов было рассчитано напряженное состояние колец и труб различной толщины, нагруженных внутренним и внешним давлением. Решение нелинейных разрешающих уравнений осуществлялось методом последовательных приближений при пошаговом увеличении давления. Анализ показал, что даже малые отклонения закона деформирования свободной цилиндрической поверхности колец (доступной измерениям) от линейного свидетельствуют о существенном возрастании окружных напряжений на нагруженной поверхности кольца. При больших давлениях может возникнуть необходимость в учете нелинейности даже при расчете напряженного состояния колец из композитов с небольшой относительной толщиной. Полученные результаты были использованы при проектировании элементов конструкций типа бандажей и шпангоутов.

Предложен простой приближенный способ оценки влияния нелинейности, основанный на кусочно-линейной аппроксимации кривой

$\epsilon_r - \epsilon_\theta$, позволивший свести рассматриваемую задачу к определению напряженного состояния в составном кольце с движущей-

45782764

ся с ростом давления границей раздела. На границе раздела задается радиальное напряжение, соответствующее точке перелома диаграммы $\sigma_r - \epsilon_r$ и записываются условия непрерывности напряжений и деформаций. Работоспособность предложенного приближенного подхода обоснована сравнением результатов вычисления напряжений с расчетом по непрерывным кривым деформирования, описанным теоретико-линейными уравнениями связи.

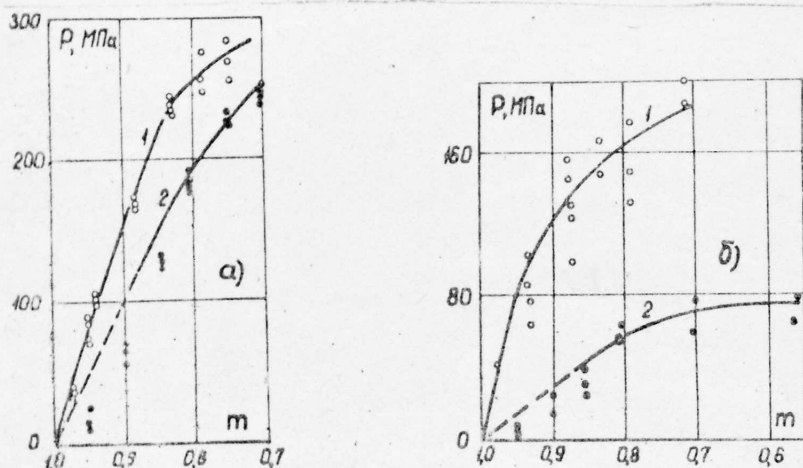


Рис. 4. Несущая способность колец из однонаправленных стеклопластиков, различающихся лишь свойствами в радиальном направлении, при внутреннем (кривые 1) и внешнем (кривые 2) давлениях: а - линейная диаграмма $\sigma_r - \epsilon_r$ и линейная деформация поверхности при нагружении; б - эти же характеристики нелинейны

Экспериментальная проверка полученных расчетных зависимостей осуществлялась нагружением колец из исследованных композитов внутренним и наружным давлением с помощью резиновых манжет в специальных приспособлениях. Замеры окружных деформаций ненагруженных поверхностей колец показали, что в кольцах с сильной нелинейностью в радиальном направлении рост этих деформаций с ростом давления замедляется; при этом замедляется и рост разрушающего давления с увеличением толщины (рис. 4). Как показали эксперименты, в ряде случаев разрушающее давление вообще перестает возрастать, т.е. увеличение толщины оказывается неэффективным. Проведенные на базе полученных результатов исследования

показали, что перенос части арматуры из окружного направления в осевое, приводящий к повышению радиальной прочности и жесткости, позволяет существенно повысить несущую способность толстостенных колец и труб из композитов. К этому же эффекту может привести радиальное армирование и использование более жестких связующих.

Последние три главы посвящены расчету и проектированию вращающихся композитных конструкций высокой энергоемкости. Вначале рассмотрены конструкции, спроектированные из расчета, что композит в них нагружен лишь на растяжение в направлении армирования. К их числу, помимо стержней и тонких колец, относятся безмоментные "нитяные" оболочки.

В пятой главе рассмотрены равнонапряженные и намотанные по геодезическим линиям вращающиеся оболочки, определены формы их меридианов и траектории армирования, исследовано напряженное состояние и энергоемкость.

Предельные значения удельной массовой энергоемкости пустотелых оболочек получены непосредственно на основании соотношений, вытекающих из уравнений равновесия и связывающих энергоемкость с напряженным состоянием. Установлено, что из оболочек с равной массой, объемом и идентичными геометрическими характеристиками на экваторе наибольшей удельной массовой энергоемкостью обладают равнонапряженные, причем отношение энергоемкости таких оболочек к энергоемкости тонкого кольца равно $\sin^2 \varphi_1$ (φ_1 - угол между армирующими волокнами и меридианом на экваторе). Таким образом, оболочки с малыми φ_1 являются заведомо неэффективными.

Определение форм меридианов и траекторий армирования оболочек осуществлено из условия совпадения траекторий армирования с направлением главных напряжений в слоях. Задачи решены для случая, когда композит обладает жесткостью как вдоль, так и поперек армирования; детально рассмотрены оболочки, сохраняющие работоспособность после растрескивания связующего в композите. Для пустотелых равнонапряженных оболочек получены следующие соотношения:

$$\sin \varphi = \frac{1}{r} \sqrt{\sin^2 \varphi_1 - \frac{\lambda}{2} (1 - r^4)},$$

$$\mathcal{Z} = \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{2\lambda}} \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{\lambda r^2 - \sin^2 \varphi_1}{\lambda - \sin^2 \varphi_1} \right),$$

$$\lambda = \frac{\rho_v \bar{\omega}^2 a^2}{\bar{e}}, \quad (10)$$

где r , $\mathcal{Z}$ - радиальная и осевая (отсчитываемая от плоскости экватора) координаты, отнесенные к радиусу экватора a ; ρ_v - плотность композита; $\bar{\omega}$, $\bar{e}$ - предельные угловая скорость и напряжение в направлении армирования. При расчете равнонапряженной оболочки с наполнителем было принято, что он полностью заполняет оболочку и при вращении создает на нее давление подобно жидкости. При этом, благодаря появлению дополнительной нормальной составляющей нагрузки, оказалось возможным спроектировать равнонапряженную оболочку, не нагруженную осевой силой. Установлено, что параметры задачи в этом случае связаны соотношением:

$$\frac{\bar{\omega}^2}{\bar{e}} = \frac{8 h_1 \cos^2 \varphi_1}{a^3 \gamma [(1 - 2 r_1^2) - r_0^2 (r_0^2 - 2 r_1^2)]}, \quad (11)$$

где r_0 - радиус фланца (полюсного отверстия) оболочки; r_1 - радиус вала внутри оболочки; h_1 - толщина оболочки на экваторе; γ - плотность наполнителя. Сравнение равнонапряженных пустотелых и с наполнителем оболочек, эквивалентных по массе материала, показало, что использование наполнителя уменьшает осевой размер оболочки и ее предельную угловую скорость. Удельная массовая энергоёмкость также оказалась меньше, несмотря на то, что выигрыш в абсолютной энергоёмкости при использовании наполнителя по сравнению с пустотелой оказался весьма значительным.

Существенным недостатком равнонапряженных оболочек является невозможность изготовления их намоткой. Поэтому были рассмотрены более технологичные оболочки - армированные по геодезическим линиям, совпадающим с направлениями главных напряжений в слоях. Проведенный анализ показал, что пустотелая оболочка, намотанная по геодезическим линиям, существенно уступает эквивалентной ей по габаритам равнонапряженной оболочке и обладает энергоёмкостью, составляющей 62-65 % от соответствующей харак-

теристики равнонапряженной оболочки. Это обстоятельство определяет целесообразность рассмотрения составной конструкции - оболочки, намотанной по геодезическим линиям и соединенной по экватору с ободом достаточно малой толщины, обеспечивающим высокое значение его массовой энергоемкости. Условие безмоментности напряженного состояния в зоне контакта и требование, чтобы первым разрушался обод или обод и оболочка разрушались одновременно, накладывают существенные ограничения на размеры полюсных отверстий оболочек и допустимые соотношения прочностных и деформативных свойств материалов обода и оболочки. Расчеты, проведенные для стекло-, угле-, боро- и органопластиков, показали, что этим ограничениям в практически приемлемом диапазоне размеров полюсных отверстий удовлетворяют лишь сочетания обода из жестких композитов (углепластика и боропластика) с оболочкой из относительно податливых материалов (стеклопластика и органопластика). Наибольшее число проектов в диапазоне параметров, представляющих практический интерес, удалось реализовать для сочетания обода из боропластика с оболочкой из стеклопластика.

Установлено, что в проектах без силового взаимодействия обода с оболочкой (в этом случае обод можно размещать и снаружи оболочки) наибольшая энергоемкость достигается при обеспечении одновременного разрушения обода и оболочки. В случае силового взаимодействия между ободом и оболочкой анализ существенно усложняется и, оставаясь в рамках малых перемещений и безмоментности оболочки, всем условиям существования проекта удается удовлетворить, используя современные композиты, лишь в редких случаях. Установлено, что в проектах с силовым взаимодействием обода с оболочкой последняя является более компактной и массовая энергоемкость всей конструкции несколько увеличивается (табл. I).

Одним из основных достоинств оболочек-маховиков является простота соединения их с валом - через полюсные отверстия; в других типах маховиков соединение с валом становится самостоятельной и серьезной проблемой. Полученные результаты свидетельствуют о том, что использование рассмотренных типов оболочек из композитов в качестве энергоемких элементов - маховиков, может оказаться целесообразным лишь в случаях, когда требования к удельным характеристикам энергоемкости не являются определя-

Таблица I

Параметры оболочек с ободом

Материал	Тип	λ	Геометрические параметры					μ	α_M
			r_0	α_s	φ_0	φ_1	Z_0		
Обод-борнопластик, оболочка - стеклопластик	Без силового взаимодей- ствия	3,10	0,15	0,1	68,4°	8,0°	0,764	0,613	0,711
	С силовым взаимодей- ствием	3,12	0,15	0,1	80°	8,5°	0,250	0,646	0,722
	- " -	3,14	0,15	0,1	85°	8,6°	0,127	0,652	0,731
Обод-углепластик, оболочка - органоластик	С силовым взаимодей- ствием	2,53	0,3	0,5	70°	16,4°	0,613	0,309	0,763
	- " -	2,43	0,4	0,5	70°	22,0°	0,682	0,342	0,846

α_M - отношение массовой энергии системы к массовой энергии свободно вращающегося кольца; $\alpha_s = \alpha_h / S$ (S - площадь поперечного сечения обода); φ_0 , φ_1 - углы армирования у полюсного отверстия (r_0) и на экваторе; $\lambda = \rho \omega^2 r_0^2 / E_1$ (ρ - напряжения вдоль армирования на экваторе); Z_0 - осевая координата полюсного отверстия; μ - относительная масса обода.

ющими. Однако они могут быть использованы в качестве вращающихся защитных кожухов для маховиков других типов, в том числе металлических, а также в других областях техники, например, в качестве центрифуг. Для получения конструкций с максимальной энергоемкостью необходимо обратиться к кольцам и дискам из композитов, в которых эти материалы существенно нагружаются и в направлении, перпендикулярном слоям.

Энергоемкость дисков, изготовленных намоткой композитов, рассмотрена в шестой главе. Элемент маховика в виде толстостенного обода обладает высокой массовой энергоемкостью и прост в изготовлении. Однако опыт расчета толстостенных композитных изделий свидетельствует о том, что чрезмерное увеличение толщины может привести к преждевременному расслоению обода и падению не только его массовой, но и объемной энергоемкости. Поэтому при анализе удельных характеристик энергоемкости дисков основное внимание было уделено учету плохого сопротивления композитов поперечному отрыву.

Проведенный при помощи МКЭ анализ объемного напряженного состояния моноотропных вращающихся дисков конечной осевой толщины показал, что максимальные значения радиальных и окружных напряжений в таких дисках можно с достаточной точностью определять по зависимостям для плоского напряженного состояния, а напряжениями σ_z и τ_{rz} можно пренебречь.

С помощью уравнения равновесия была установлена связь между напряженным состоянием вращающегося диска и его энергоемкостью. На ее основе, с использованием критерия прочности по максимальным напряжениям, получены выражения для удельных массовой (W^M) и объемной (W^V) энергоемкостей, которые для частного случая свободно вращающихся дисков постоянной толщины имеют вид

$$W^M = \frac{\rho_0^+ + \rho_r^+}{2\rho_v} - \frac{\int_m^1 (\rho_\theta^+ - \sigma_\theta) \rho d\rho + \int_m^1 (\rho_r^+ - \sigma_r) \rho d\rho}{\rho_v (1 - m^2)},$$

$$W^V = \frac{(\rho_\theta^+ + \rho_r^+)(1 - m^2)}{2} - \left[\int_m^1 (\rho_\theta^+ - \sigma_\theta) \rho d\rho + \int_m^1 (\rho_r^+ - \sigma_r) \rho d\rho \right], \quad (12)$$

где P_{θ}^{+} , P_r^{+} - пределы прочности при растяжении в окружном и радиальном направлениях; $p=r/b$; $m=a/b$; a , b - внутренний и внешний радиусы диска; ρ_v - плотность материала.

В общем случае $\max W^M$ и $\max W^V$ достигаются в дисках различных относительных размеров. Чтобы облегчить поиск заданного сочетания удельных характеристик энергоемкости, были введены их приведенные значения, определяемые радиальной и окружной прочностью материала при растяжении $\bar{W}_{r,\theta}^M = P_v(3+\nu_{r\theta}) W_{r,\theta}^M / P_{r,\theta}^{+} = \frac{1+m^2}{46} \max$; $\bar{W}_{r,\theta}^V = \frac{3+\nu_{r\theta}}{P_{r,\theta}^{+}} W_{r,\theta}^V = \frac{1-m^4}{46} \max$, где $\bar{G}_{r,\theta}^{\max} = G_{r,\theta}^{\max} / [\rho_v \omega b^2 (3+\nu_{r\theta})]$ максимальные приведенные напряжения в дисках заданных размеров из материала с заданными упругими свойствами. Это позволило уменьшить число варьируемых параметров до трех (m , $\beta = \sqrt{E_{\theta}/E_r}$, P_{θ}^{+}/P_r^{+}) при сохранении общности результатов. В диапазоне $0,1 \leq m \leq 0,9$; $1 \leq \beta \leq 10$; $1 \leq P_{\theta}^{+}/P_r^{+} \leq 100$ для свободно вращающихся и закрепленных на жестком валу дисков вычислены значения $\bar{W}_{r,\theta}^M$ и $\bar{W}_{r,\theta}^V$, определены оптимальные размеры дисков и выявлены области значений параметров, при которых максимальные удельные энергоемкости определяются различными предельными состояниями. Полученные данные позволяют также устанавливать свойства материала, обеспечивающие максимальные характеристики энергоемкости диска заданных размеров (если эти свойства можно варьировать) и определять сочетания упругих и прочностных свойств, при которых удастся совместить в одном диске приемлемые значения как массовой, так и объемной удельных энергоемкостей.

Анализ показал, что для современных композитов свободно вращающиеся диски как накопители энергии намного эффективнее дисков с жесткой посадкой; максимальная массовая энергоемкость достигается для этих материалов в кольцах минимальной толщины, а объемная - при относительных размерах в диапазоне $0,70+0,85$. Установлено также, что начальные термические напряжения, сопровождающие изготовление дисков намоткой, значительно понижают удельные энергоемкости дисков из высокомодульных композитов.

Наиболее существенным недостатком дисков, изготовленных намоткой композитов, является низкое значение их удельной объемной энергоемкости. Применительно к дискам из современных композитов рассмотрены конструктивные и технологические методы повышения

W^V - использование балласта, предварительное напряжение, ра-

диальное армирование, деление диска на слои, связанные податливыми прослойками. В каждом случае определено сочетание параметров, обеспечивающее наибольшую результативность метода. Сравнение эффективности этих методов приведено на рис. 5, где достигнутые удельные характеристики отнесены к предельным значениям объемной $W_{np}^V = \frac{1}{2}(\Pi_{\theta}^+ + \Pi_{r}^+)$ и массовой $W_{np}^M = \Pi_{\theta}^+ / (2\rho_v)$ энергоемкостей. Наибольший прирост объемной энергоемкости в результате реализации рассмотренных мер достигается у существенно анизотропных композитов (угле- и органопластиков); наиболее близкие к предельным значения достигаются при использовании радиально-окружного армирования. Однако повышение объемной энергоемкости (от 7 до 165 %) сопровождается существенными потерями в массовой, которая в рассмотренных конструкциях составила примерно 0,5 от предельной

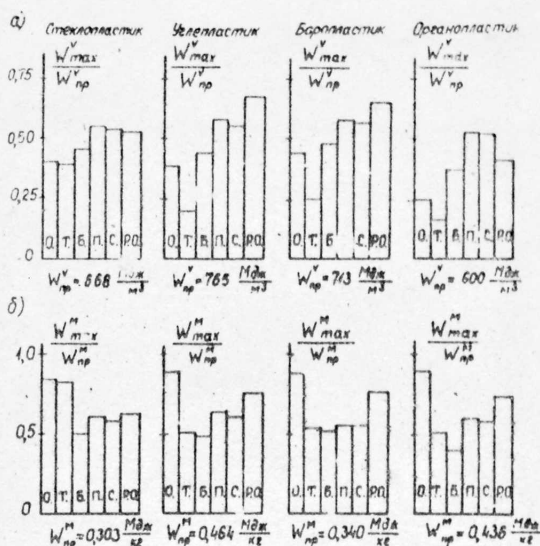


Рис. 5. Относительные значения объемной (а) и массовой (б) энергоемкостей дисков оптимальных размеров, разрушающихся одновременно от σ_r^{max} и σ_{θ}^{max} (О. - окружное армирование, Т. - с учетом начальных температурных напряжений, Б. - балласт, П. - предварительное напряжение, С. - составной диск, Р.О. - радиально-окружное армирование)

Формирование импульсов энергии большой мощности с помощью маховиков осуществляется за счет их резкого торможения. Динамичность нагружения оценивается сравнением времени нарастания крутящего момента с периодом собственных крутильных колебаний. Осуществлена оценка влияния угловой скорости вращения диска на частоты собственных крутильных колебаний, сопровождающихся при вращении радиальными. В результате анализа решения частотного уравнения установлено, что угловая скорость в пределах, определяемых несущей способностью современных композитов, не оказывает влияния на собственные частоты крутильных колебаний дисков из этих материалов и их можно определять на покоящихся дисках.

При проектировании и изготовлении маховиков в виде дисков необходимо учитывать технологическую предисторию и использовать разработанные методы управления напряженным состоянием в толсто-стенных композитных изделиях. При этом можно в значительной степени увеличить объемную энергоемкость дисков, повышая их несущую способность по радиальным напряжениям. Для соединения диска-обода со ступицей без потерь в несущей способности целесообразно использовать хордовую намотку, в процессе которой ленты или жгуты полуфабриката композита укладываются практически по прямым линиям (хордам) на торцевые плоскости обода маховика, охватывая его периферию.

Новый класс намоточных конструкций — хордовые маховики из композитов, рассмотрен в седьмой главе. Их расчет включает вопросы равновесия нити при хордовой намотке, необходимого для ее реализации, анализ напряженного состояния маховика при равномерном вращении и торможении, исследование его энергоемкости и мощности.

Установлено условие, обеспечивающее равновесие при укладке нити по хорде на абсолютно гладкую оправку-диск. При намотке по геодезической линии нить, огибая край оправки, должна удерживаться на поверхности конуса с вершиной в точке перегиба, осью направленной по касательной в этой точке и углом при вершине, равном угловому размеру хорды. Получены законы движения нитеукладчика по прямолинейной и круговой траекториям, обеспечивающие выполнение этого условия. Они определялись вычислением точек пересечения траекторий с поверхностью поворачивающегося конуса.

Учет трения между нитью и периферией оправки позволил существенно упростить кинематическую реализацию хордовой намотки и использовать один и тот же закон движения при укладке хорд различных размеров. При этом ставилось условие, чтобы траектория укладки нити на периферии оправки не выходила за траектории предельного отклонения. Подробно исследован случай, когда движение нитеукладчика осуществляется кулисным механизмом. Показано, что при оптимальной настройке с его помощью можно укладывать хорды в широком диапазоне угловых размеров, не выходя за пределы реальных значений коэффициентов трения.

Задача о напряженном состоянии системы спиц-хорд при равномерном вращении сведена к задаче об одном многоопорном стержне (полухорде) с заданными направлениями перемещений и реакцией в опорах (точках пересечения с другими хордами), нагруженном центробежными силами и силой на внешнем конце, определяемом из условий совместности перемещения стержня и обода. Анализ решения вспомогательной задачи о продольно-поперечном изгибе двухопорной гибкой балки в поле центробежных сил показал, что для реальных значений жесткости и размеров хорд-спиц можно использовать лагранжевы координаты и пренебречь продольным изгибом. Это позволило свести задачу о расчете спиц-хорд к линейной и считать, что спицы нагружены лишь поперечными и продольными силами. Для проверки предложенного метода расчета были использованы результаты разгонных испытаний моделей маховика из стеклопластика. Результаты предельных значений окружных скоростей (654+722 м/сек) удовлетворительно совпали с вычисленным значением (670 м/сек).

Аналогичный подход использовался для расчета напряженного состояния хордового маховика при плавном торможении. Спицы по-прежнему моделировались многоопорными стержнями, испытывающими поперечный изгиб в сочетании с растяжением или сжатием в зависимости от ориентации спицы по отношению к направлению торможения. Для проверки положенных в основу расчета гипотез было проведено тензометрирование деформаций спиц маховика, нагруженного крутящими моментами, приложенными к ободу и ступице. Для этого случая нагружения совпадение экспериментальных деформаций с расчетными оказались удовлетворительным.

Разработанные методы расчета были использованы для анализа

энергоёмкости маховиков и определения предельной мощности при подводе и съеме энергии. Рассматривались маховики, спицы и обод которых изготовлены из четырех композитов: стекло-, угле-, боро- и органопластика. После выбора пары материалов для различных сочетаний геометрических размеров маховика (относительных размеров обода и спиц при заданном радиусе ступицы, определяющем число спиц) строились линии уровня, соответствующие различным значениям массовой и объемной энергоёмкостей маховика. Примеры таких линий приведены на рис. 6. Анализ удельных характеристик, представленных в таком виде, позволил выявить при заданных свойствах материалов спиц и обода области геометрических параметров хордовых маховиков, обеспечивающих приемлемые сочетания массовой и объемной удельных энергоёмкостей. Одновременно устанавливался и тип разрушения, оказывающий существенное влияние на выбор конструкции маховика.

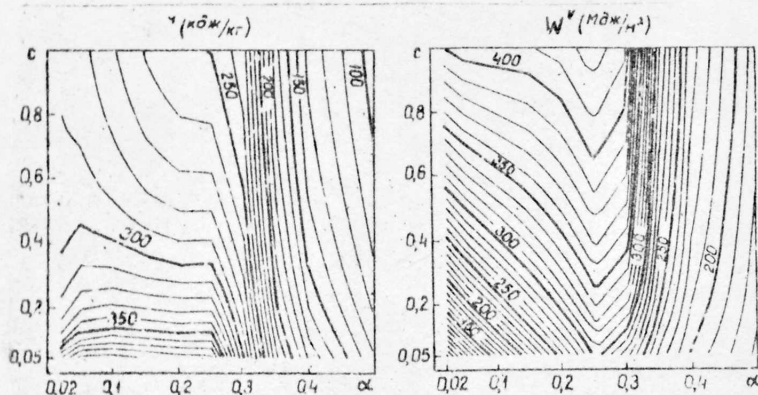


Рис. 6. Линии уровня массовой (W^M) и объемной (W^V) энергоёмкостей хордовых маховиков с ободом из углепластика и спицами из органопластика: α - отношение радиальной толщины обода-диска к его наружному радиусу, c - отношение площади поперечного сечения спиц к площади наружной цилиндрической поверхности обода. При $\alpha \leq 0,25$ происходит разрушение обода от окружных напряжений, и $\alpha > 0,25$ - от радиальных

Для выбранных оптимальных по удельной энергоёмкости хордовых маховиков были определены режимы их плавного разгона и торможения. Несущая способность маховика при ускорении определяется

ся прочностью спиц на растяжение. Получены зависимости между предельной приведенной удельной массовой мощностью и массовой энергоемкостью маховиков при подводе и съеме энергии, позволяющие оценить возможность формирования с помощью маховиков требуемых импульсов мощности.

Полученные результаты являются основой для оптимального проектирования хордовых маховиков и позволяют выбрать сочетания материалов и геометрические параметры, обеспечивающие наилучшие для заданных условий сочетание удельных характеристик энергоемкости с требуемой мощностью при съеме энергии. Они использованы при изготовлении инерционных накопителей энергии различного назначения. Испытания подтвердили перспективность хордовых маховиков. Результаты исследования механики хордовой намотки позволяют проектировать и настраивать механизмы для осуществления этого вида намотки при изготовлении ряда различных изделий, в частности, они реализованы при изготовлении опорных колец крепления статорной обмотки крупных турбогенераторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы, выносимые на защиту, сводятся к следующему:

1. Введены две модели процесса намотки - дискретная и модель "растущего" тела, позволяющие рассчитывать напряженное состояние в наматываемом изделии при любом законе деформирования полуфабриката и оценены погрешности, связанные с принятыми гипотезами. Проведен численный анализ напряженного состояния при намотке полуфабриката, ужесточающегося при поперечном сжатии и определены области возможного использования упрощенных (линейных) моделей. Для различных свойств полуфабриката определены области относительных толщин изделий, намотка которых сопровождается искривлением слоев. Приведены оценки максимально возможного давления на обматываемую деталь; расчетное давление на оправку сопоставлено с экспериментальным.

2. Разработан метод расчета программы изгибания усилия натяжения при намотке, обеспечивающей заданное напряженное состояние в готовом изделии. С помощью предложенного метода численно решена задача о программировочной намотке нелинейного при поперечном сжатии (в состоянии намотки и разогрева) полуфабриката,

получены аналитические зависимости для линейно-упругого материала, рассмотрена намотка с послойным отверждением. Рассчитанные программы реализованы экспериментально.

3. Показана необходимость учета нелинейности радиальных свойств при расчете колец и труб из композитов, нагруженных давлением высокой интенсивности. Предложен приближенный метод учета нелинейности и оценена его точность. Теоретически и экспериментально доказана существенная перегрузка витков, расположенных со стороны приложенного давления, указаны методы повышения несущей способности толстостенных композитных изделий.

4. Разработаны методы расчета вращающихся оболочек из композитов и оценены возможности их использования в качестве накопителей энергии. Показано, что наибольшей массовой энергоемкостью обладают равнонапряженные оболочки, определены меридианы и траектории армирования таких оболочек как пустотелых, так и с наполнителем. Рассмотрены оболочки, намотанные по геодезическим линиям — пустотелые и с ободом по периферии.

5. Оценена возможность использования вращающихся дисков, изготовленных намоткой композитов, в качестве энергоемких элементов маховиков. Исследовано влияние прочностной и деформативной анизотропии и начальных термических напряжений на удельные энергоемкости вращающихся дисков, рассмотрены различные способы определения их максимальных значений. Оценена эффективность различных способов повышения объемной энергоемкости дисков из современных композитов и показано, что все они связаны с потерями в массовой энергоемкости. Установлено, что угловая скорость в пределах, определяемых несущей способностью дисков из современных композитов, не оказывает влияния на собственные частоты их крутильных колебаний.

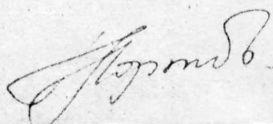
6. Разработаны и сопоставлены с экспериментом методы расчета хордовых маховиков при равномерном вращении и плавном торможении, исследованы зависимости энергоемкости хордовых маховиков из современных композитов от их геометрических параметров, определены их предельные массовые мощности при подводе и съеме энергии. Исследована механика процесса хордовой намотки; определены условия равновесной укладки хорд с учетом и без учета трения об оправку, определены реализующие равновесную намотку законы движения нитеукладчика и параметры оптимальной настройки привода.

7. От внедрения результатов работы, использованных при расчете, проектировании и изготовлении из композитов предварительно напряженных конструкций электрических машин и аппаратов, изделий новой техники ответственного назначения, хордовых маховиков и обору-дования для хордовой намотки, получен, подтвержденный докумен-тально, значительный экономический эффект.

По тем. диссертации опубликовано 49 научных работ. Основные ее положения отражены в следующих работах.

1. Тарнопольский Ю.М., Портнов Г.Г. Изменение усилия натяжения при намотке изделий из стеклопластика, - Механика полимеров, 1966, № 2, с. 278-284.
2. Влияние натяжения и искривления армирующих волокон на проч-ность и деформативность стеклопластиков /Тарнопольский Ю.М., Портнов Г.Г., Жигун И.Г. и др. - М.: ОНТИ, 1968. - 52 с.
3. Тарнопольский Ю.М., Портнов Г.Г. Особенности механики намот-ки армированных пластиков. - В кн.: Прочность и пластичность - М.: Машиностроение, 1971, с. 294-297.
4. Тарнопольский Ю.М., Портнов Г.Г. Программированная намотка стеклопластиков: - Механика полимеров, 1970, № 1, с.48-53.
5. Тарнопольский Ю.М., Портнов Г.Г., Спридзанс Ю.В. Компенсация температурных напряжений в изделиях из стеклопластиков мето-дом послойной намотки. - Механика полимеров, 1977, № 4, с. 640-645.
6. Несущая способность колец, образованных намоткой композитов, армированных высокомодульными анизотропными волокнами /Тар-нопольский Ю.М., Портнов Г.Г., Спридзанс Ю.В. и др. - Меха-ника полимеров, 1973, № 4, с. 673-683.
7. Описание нелинейных деформативных свойств материала намоточ-ных колец /Портнов Г.Г., Булманис В.Н., Бейль А.И. и др. - Механика полимеров, 1974, № 4, с. 608-617.
8. Портнов Г.Г., Булманис В.Н. Способы учета нелинейности деформи-тивных свойств материала при расчете толстостенных колец из композитов. - Механика полимеров, 1976, № 1, с. 73-84.
9. Tarnopolski J.M., Portnov G.G., Beil A.I. Technische Wick- lungstheorie der verstärkten Verbundwerkstoffe mit Polymer- Matrix. - Verstärkte Plaste 76, Dresden, DDR, Kammer der Tech- nik, 1976, S. 595-599.

10. Портнов Г.Г., Бейль А.И. Модел. для учета нелинейности свойств полуфабриката при силовом анализе намотки композитов. - Механика полимеров, 1977, № 2, с. 231-240.
11. Селезнев Л.Н., Портнов Г.Г. Хордовая намотка дисков лентами из композитов. - Механика полимеров, 1977, № 6, с. 998-1001.
12. Портнов Г.Г., Кулаков В.Л. Исследование энергоемкости маховиков из композитов, изготовленных намоткой. - Механика полимеров, 1978, № 1, с. 73-81.
13. Портнов Г.Г., Кулаков В.Л. Удельная массовая энергоемкость дисковых маховиков из композитов. - Механика композитных материалов, 1980, № 5, с. 887-894.
14. Тарнопольский Ю.М., Портнов Г.Г., Бейль А.И. Механика намотки композитов. - Известия АН ЛатвССР, 1980, № 12 (401), с. 80-97.
15. Кулаков В.Л., Портнов Г.Г. Уточненный расчет вращающихся дисков из композитов. - Механика композитных материалов, 1981, № 2, с. 267-272.
16. Воропаев В.И., Портнов Г.Г., Селезнев Л.Н. Экспериментальная оценка энергоемкости маховиков из композитов. - Механика композитных материалов, 1982, № 1, с. 159-163.
17. Портнов Г.Г., Тарнопольский Ю.М. Энергоемкость вращающихся дисков и оболочек из композитов. - Механика композитных материалов, 1982, № 2, с. 290-300.
18. Портнов Г.Г., Поляков В.А. Энергоемкость вращающихся конструкций из композитов, работающих на одноосное растяжение. - Механика композитных материалов, 1982, № 2, с. 301-306.
19. Моорлат П.А., Портнов Г.Г., Селезнев Л.Н. Равновесие нити с учетом трения при хордовой намотке дисков из композитов. - Механика композитных материалов, 1982, № 5, с. 859-864.
20. Модели для силового анализа намотки композитов /Бейль А.И., Мансуров А.Р., Портнов Г.Г. и др. - Механика композитных материалов, 1983, № 2, с. 303-313.
21. Tarnopolski J.M., Portnov G.G., Beil A.I. Technological problems in composite winding mechanics. - In: Mechanics of Composites. - Moscow, 1983, p. 186-222.
22. Моорлат П.А., Портнов Г.Г. Расчет напряженно-деформированного состояния хордового маховика со спицами. - Механика композитных материалов, 1983, № 5, с. 853-862.



ПОРТНОВ Георгий Георгиевич

ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ
ТОЛСТОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ
ИЗ КОМПОЗИТОВ МЕТОДОМ НАМОТКИ

автореферат диссертации

Подписано к печати 05.12.84. ЯТ 05381
Заказ № 4238 Тираж 200 экз. Объем 2 печ.л.
Формат 60х90/16 Бесплатно.

Отпечатано на ротапринтере Института
электроники и вычислительной техники
АН ЛатвССР, 226006, Рига, ул. Академijas, 14