



Данг Хоанг Минь

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕМ И
ПРОИЗВОДСТВОМ КОМПОЗИЦИОННЫХ БАЛЛОНОВ,
ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ НАМОТКИ**

Специальность:

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования (ФГБОУ ВПО) «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» на кафедре «Компьютерные системы автоматизации производства» РК-9.

Научный руководитель: **Гаврюшин Сергей Сергеевич**
доктор технических наук, профессор, кафедра «Компьютерные системы автоматизации производства» РК-9 ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», заведующий кафедрой

Официальные оппоненты: **Комков Михаил Андреевич**
доктор технических наук, профессор, кафедра «Технологии ракетно-космического машиностроения» СМ-12 ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», профессор
Филипенко Александр Анатольевич
кандидат технических наук, ФНПЦ ОАО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», заместитель главного конструктора

Ведущая организация: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
Российской академии наук (ИМАШ РАН)

Защита состоится «13» 02 2013 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного Совета Д 212.141.06 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ Баумана.

Телефон для справок 8(499) 267-09-63

Автореферат разослан «11» 01 2013 г.

Учёный секретарь
диссертационного Совета

Доктор технических наук, доцент



Михайлов В.П.



2670

Актуальность работы

В настоящее время процесс непрерывной намотки является одним из самых распространённых и совершенных процессов изготовления высокопрочных армированных оболочек из композиционных материалов (КМ). Одним из важнейших применений данной технологии является создание композиционных баллонов, которые, в свою очередь, находят широкое применение в авиационной технике, судостроении, автомобилестроении и других отраслях промышленности, а также в качестве ёмкостей для хранения газа или жидкостей под высоким давлением.

Конструкторами, расчетчиками, технологами и производственниками накоплен большой опыт в разных отраслях данной деятельности. Фундаментальные работы в области механики композитов принадлежат Болотину В.В., Васильеву В.В., Думанскому А.М., Каюмову Р.А., Протасову В.Д., Семёнову Б.И., Ярославцеву В.М., George Lubin, Peters S.T. и др. В области проектирования и расчета композиционных конструкций большой вклад внесли: Алфутов Н.А., Бакулин В.Н., Зиновьев П.А., Кузьмин М.А., Лебедев Д.Л., Миткевич А.Б., Попов Б.Г., Сарбаев Б.С., Смердов А.А., Тарнопольский Ю.М., Koussios Sotiris, Reddy J.N. и др.; в области технологии: Буланов И.М., Комков М.А., Малышева Г.В., Нехороших Г.Е., Резник С.В., Тарасов В.А. и др. Вопросам по разработке автоматизированной системы технической подготовки производства композитных изделий посвящены работы Добровольского А.К., Евгенева Г.Б., Морозовой В.М. и др.

В настоящее время, в связи с активным использованием новых типов композитов, новых технологий, появлением новых технических решений вскрываются проблемы, требующие дальнейшего развития и совершенствования.

Комплексное решение поставленных задач связано с высоким уровнем автоматизации информационной поддержки и интеллектуального управления жизненным циклом продукции (ЖЦП), которая включает в себя методологию и формализованные методы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП) и т.д.

Концепция ЖЦП находит широкое применение в создании изделий из стандартных материалов в современной технике. Основные теоретические положения в области автоматизации информационной поддержки ЖЦП (Continuous Acquisition and Life-cycle Support (CALS-технология)) изложены в работах Братухина А.Г., Кондакова А.И., Норенкова И.П., Овсянникова М.В., Соломенцева Ю.М. и др. Вместе с тем отдельные вопросы остаются недостаточно проработанными. В частности, многие специалисты утверждают, что использование существующих каскадной (до 70-х гг.), итерационно-возвратной (70–80-е гг.) и спиральной (80–90-е гг.) моделей жизненного цикла (ЖЦ) для производства изделий из композита оказывается неприемлемым из-за несогласованных, а порой, даже и противоречивых требований разработчиков и изготовителей изделий из КМ.

На сегодняшний день разработчики композитных конструкций должны обладать знаниями квалифицированных конструкторов, расчётчиков, технологов, и иметь полное представление о возможностях используемого оборудования. В противном случае появляются элементы несогласованности и даже противоречия между отдельными этапами ЖЦ, что требует повторного согласования изменённых

исходных данных и многократных повторов на этапах проектирования, анализа и разработки технологического процесса изготовления. Не всегда спасает ситуацию обращение к современным программам автоматизации расчета композиционных конструкций. Так, например, в программах, используемых для решения задач по изготовлению композиционных баллонов с днищами (CADFIL, CADWIN, ComposicaD, FiberGrafIX, WINDING EXPERT) в основном рассматривается только схема геодезического армирования. В то время как существуют и другие схемы армирования, такие как плоскостная, линий постоянного геодезического отклонения (ЛПО), равнотолщинная, локсодрома, продольная и т.д., которые вполне могут оказаться более эффективными для конкретных технологий.

В связи с вышеизложенным, разработка единой методики автоматизации и интеграции процессов синтеза, совместного проектирования и анализа, позволяющей доступно и интегрировано управлять всеми этапами производства на протяжении ЖЦ композитных изделий, является актуальной и востребованной научно-практической задачей.

Целью диссертационной работы является создание комплексной методики автоматизации производства тонкостенных изделий из КМ методом непрерывной намотки путём обеспечения высокой совместности и интеграции АСУТП, АСУП и АСТПП, позволяющей повысить качество и сокращение срока производства.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- провести анализ требований, проблем, а также устранить возможные несогласованности на различных этапах ЖЦ баллонов из композита, изготовленных методом намотки.

- учесть возможность эффективного согласования расчетных методов при различных схемах намотки. Для каждой схемы установить расчётные соотношения на основе ленточной модели армирующего материала.

- на основе многопараметрического подхода для каждой схемы выбрать все параметры для последовательных этапов ЖЦ и классифицировать их в 3 группы: управляемых, целевых и неизменяемых фиксированных параметров. Разработать математическую модель для синтеза оптимального процесса намотки.

- создать методику, позволяющую на основе полученных рациональных параметров осуществить процесс автоматического проектирования, прочностного анализа и выбора оптимального процесса намотки в рамках единого информационного пространства.

- разработать пакет прикладных программ на основе единой методики синтеза, проектирования и анализа композиционного баллона методом намотки. На основе разработанного пакета программ провести тестовые расчёты.

- разработать экспериментальный стенд для проверки реализуемости разных траекторий намотки.

Методы исследования

При выполнении диссертационной работы в рамках системного подхода использовались: декомпозиционный метод для автоматизации проектирования; многопараметрический подход; прямые методы однокритериальной оптимизации Нелдера-Мида и сопряжённых направлений с ортогональным сдвигом (СНОС); многокритериальный подход с использованием метода исследования пространства параметров (ИПП); метод конечных элементов (МКЭ) с использованием способа изопараметрического описания и схемы циклической симметрии; методика расчета

упругих многослойных композиционных материалов при трёхосном напряжённом состоянии. Эксперименты проводились в лаборатории Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В рамках разработанной единой методики на языке MAPLE разработан пакет прикладных программ PVRK9. Для проверки правильности результатов методики анализа проведён расчёт в среде программного комплекса ANSYS. Многокритериальный анализ проводился с помощью прикладной программы MOVI, математическая модель при этом была написана на языке MATLAB.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Разработана комплексная методика автоматизированного синтеза баллонов из КМ, основанная на многопараметрическом подходе.
2. Для решения задачи автоматизированного синтеза и нахождения допустимых вариантов производства баллонов из КМ использован комплексный подход на основе численных итерационных однокритериальных оптимизационных методов Нелдера-Мида и сопряжённых направлений с ортогональным сдвигом.
3. Предложен алгоритм многокритериального синтеза с применением метода исследования пространства параметров для автоматизации процесса нахождения Парето-оптимальных решений производства баллонов из КМ.
4. Разработана методика автоматизированного анализа напряжённо-деформированного состояния (НДС) баллонов из КМ, основанная на использовании метода конечных элементов со способом изопараметрического описания и схемой циклической симметрии.
5. Применён вариант деформирования упругих многослойных КМ при трёхосном напряжённом состоянии для определения матрицы упругих констант слоистого композита конечного элемента.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Комплексная методика автоматизированного синтеза баллонов из КМ.
2. Алгоритм и программно-аппаратная реализация этапов совместного процесса проектирование-анализ-изготовление в виде пакета прикладных программ PVRK9 и экспериментального стенда.
3. Новые теоретические и экспериментальные результаты в форме графиков зависимостей функций невязки (критериев качества) от конструктивных и технологических параметров, графиков зависимости между собой функций невязки (критериев качества), диаграмм распределений допустимых и оптимальных решений, численных данных в виде таблиц критериев и параметров.
4. Рекомендации по выбору рациональных схем и определения диапазонов рациональных параметров технологического процесса намотки.

Практическая значимость

1. Комплексная методика автоматизированного синтеза баллонов из КМ позволяет производить поиск рациональных вариантов процесса изготовления применительно к существующим производственным условиям.
2. Пакет PVRK9 и экспериментальный стенд позволяют сократить время и сопоставить различные варианты производства при разных требованиях и условиях эксплуатации.
3. Новые теоретические и экспериментальные результаты позволяют оценить влияние основных параметров на этапах процесса проектирование-расчет-

изготовление композиционных баллонов на функциональные характеристики изделия.

Достоверность результатов работы достигается корректной постановкой и разработкой математических моделей намотки с использованием результатов обобщения и анализа многочисленных разработок отечественных и зарубежных авторов. Решения, найденные на этапе синтеза, подтверждаются результатами, полученными на экспериментальном стенде. Обоснованность результатов анализа обеспечивается верификацией расчётов в известных лицензионных системах автоматизированного анализа.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на конференции «Эффективные методы автоматизации подготовки и планирования производства» (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2 февраля 2012 г.); на международном научном симпозиуме «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова (Ярополец, 13-17 февраля 2012 г.); на научном семинаре кафедры «Ракетно-космические композиционные конструкции» СМ-13 (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 10 марта 2012 г.); на научном семинаре кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» СМ-12 (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 05 июня 2012 г.); на 67-ом Московском ежемесячном семинаре молодых учёных и студентов по проблемам машиноведения МЕСМУС (институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, 19 сентября 2012 г.); на II международной конференции «неклассические задачи механики», посвященной 80-летию Валишвили Н.В., г. Кутаиси, Грузия, 6-8 октября 2012 г.; на международной научно-практической конференции «Фундаментальные проблемы создания и поддержки высокотехнологичных производств», посвященной 25-летию создания факультета Робототехника и комплексная автоматизация МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 22-23 октября 2012 г.).

По результатам диссертационной работы опубликовано 6 научных работ, из них 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, присутствующих в Перечне ВАК РФ.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Содержит 174 страницы машинописного основного текста, включая 135 рисунков и 21 таблицу и список литературы из 90 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, приводятся постановка задач и краткая аннотация содержания работы по разделам, дана оценка новизны и практической ценности полученных результатов, сформулированы защищаемые положения.

Первая глава содержит изложение концепции автоматизации и управления ЖЦП применительно к проблеме производства изделий из КМ. Отмечается, что в целом ряде случаев имеет место рассогласование и даже противоречивость в требованиях, предъявляемых к изделию со стороны участвующих в его создании

специалистов (заказчик, технолог, расчётчик, конструктор, материаловед, эксплуатационник, изготовитель и т.д.).

Анализируются, изложенные в доступных автору источниках, современные методики и алгоритмы, посвященные применению концепции единого информационного пространства (ЕИП) применительно к АСУТП, АСУП, АСТПП для нахождения согласованных решений, удовлетворяющих требованиям всех участников в ЖЦП. Приведены краткие сведения о современных аппаратно-программных средствах для изготовления изделий из КМ методом намотки. Отмечается факт, что в большинстве существующих систем недостаточно используется единое информационное представление данных об изделии, позволяющее согласовать требования на различных этапах и рациональные согласованные параметры.

Вторая глава посвящена разработке единой методике автоматизации синтеза, проектирования и анализа, основанная на модифицированной модели ЖЦП для производства изделий из КМ методом намотки (рис. 1).



Рис. 1. Упрощённая модифицированная модель ЖЦП, изготовленной из КМ методом намотки

Основное отличие модифицированной модели ЖЦП от существующих моделей состоит в предложенном центральном этапе, который необходим для разрешения возникающих конфликтов путём использования многопараметрического и (или) многокритериального подходов для формулировки и решения задачи автоматизированного синтеза. В результате синтеза можно получить допустимые решения, удовлетворяющие требованиям участников в ЖЦ. По окончании процедуры согласования, реализация этапов ЖЦП осуществляется по алгоритму, характерному для конкретного композитного изделия. Задача синтеза (рис. 2) формулируется на основе многопараметрического подхода, согласно которому параметры, характеризующие изделие на всех этапах ЖЦ делятся на три группы:

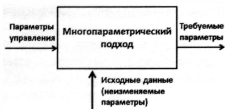
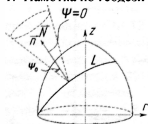


Рис. 2. Формулировка задачи синтеза на основе многопараметрического подхода

И, в-третьих, неизменяемые параметры (физико-механические свойства материалов, характеристики оборудования и т.д.).

В третьей главе приведены основные соотношения и разработанные математические модели, используемые для постановки задачи автоматизированного синтеза и совместного проектирования баллона, изготовленного из композита при различных схемах намотки. Ниже кратко перечислены свойства и область применения данных траекторий.

1. Намотка по геодезической линии (ГЛ) (рис. 3)

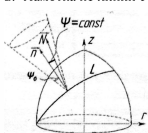


$$\text{- Свойство: } \tan \Psi = 0 \rightarrow \begin{cases} \xi = r \cdot \sin(\varphi(r)) = \text{const} \\ n \neq 0 \end{cases}$$

- Данная схема обеспечивает устойчивое положение ленты на поверхности оправки, соединяет две точки на поверхности вращения по кратчайшему расстоянию и обеспечивает условия соприкосновения наматываемого материала с полюсным отверстием.

Рис. 3. Намотка по ГЛ

2. Намотка по линии с постоянным геодезическим отклонением (ЛПО)

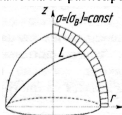


- Свойство: $\tan \Psi = \text{const}$ (рис. 4)

- Применяется в случаях, когда требуется повернуть рисунок намотки более круто, чем поворачивает геодезическая, а также при намотке цилиндрической части баллона. Данная технология позволяет осуществить предельно реализуемые в технологическом отношении траектории армирования, т.к., исключая соскальзывание с оправки, допускает при заданном коэффициенте трения максимальное отклонение от ГЛ.

Рис. 4. Намотка по ЛПО

3. Намотка по равнопрочной (равнонапряжённой) линии (рис. 5)



-Свойство:

$$r \cdot \cos^n \varphi(r) \cdot [1 - (1 - n) \cdot \cos^2 \varphi(r)]^{\frac{1-n}{2}} = \text{const}$$

- Преимущество данной траектории состоит в отсутствии лишней, неработающей массы, что позволяет привести к конструкции с минимальной массой. Данная схема имеет ограничение по условию несоскальзывания нитей.

Рис. 5. Равнопрочная линия

4. Изотензоид - композиционный баллон, изготовленный методом равнопрочной намотки с применением нитяной модели армирующего материала. Изотензоид имеет свойство $\left\{ \begin{array}{l} \text{равнопрочная} \\ \sigma_1 \gg \sigma_2 \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} n = 0 \\ \varepsilon = \text{const} \end{array} \right.$.

5. Намотка по линии локсодромы (рис. 6)

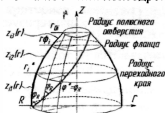


Рис. 6. Намотка по линии локсодромы

6. Намотка по равнотолщинной траектории намотки (рис. 7)

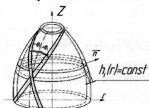


Рис. 7. Намотка по равнотолщинной линии

7. Намотка по плоскостной (планарной) линии (рис. 8)

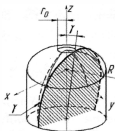


Рис. 8. Намотка по плоскостной линии

8. Намотка по продольной линии (рис. 9)



Рис. 9. Намотка по продольной линии

9. Намотка по окружной линии

- Свойство: $\varphi(r) \approx 90^\circ$
- Рекомендуется при намотке цилиндрической части баллона

- Свойство: $\varphi(r) = \varphi_R = \text{const}$

- Применяется, когда конструктор требует на некотором отсеке поверхности реализовать постоянный угол намотки.

- Данная линия может оказаться неравновесной.

- Свойство: $\eta = r \cdot \cos \varphi(r) = \text{const}$

- Применяется в случае, когда требуется обеспечить постоянство толщины стенок изделия.

- Данная линия может оказаться неравновесной.

- Свойство: спиральный виток лежит в 1-ой плоскости, составляющей угол γ с осью вращения оболочки.

- Данная технология технологична и проста для исполнения и может быть рекомендована в случае малого диаметра полюсного отверстия.

- Свойство: $\varphi(r) \approx 0^\circ$

- Рекомендуется при намотке днища, не имеющегося полюсного отверстия

Здесь $\vec{n}$ – вектор внешней нормали к поверхности; $\vec{N}$ – вектор главной нормали к кривой L ; $|\tan \Psi_0| = f_T$ – располагаемый коэффициент трения нити на поверхности оправки; Ψ – угол геодезического отклонения (угол между векторами $\vec{n}$ и $\vec{N}$); ξ – функция Клеро; σ_1, σ_2 – напряжения вдоль и поперёк армирующих элементов слоя соответственно; коэффициент $n = \frac{E_2(1+\nu_{21})}{E_1(1+\nu_{12})}$ характеризует тем, что при ленточной модели армирующего материала учитываются не только нагружение в направлении вдоль (E_1 – модуль упругости) но и поперёк (E_2) армирующих элементов слоя; ν_{12}, ν_{21} – коэффициенты Пуассона; R – радиус цилиндрической части (экватора); $\varphi(r)$ – закон армирования (угол намотки); φ_R – угол намотки на экваторе.

Разработанные модели позволяют по заданному вектору параметров управления $\{\bar{\alpha}\} = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N\}^T$ вычислить все невязки и критерии качества

$\{\bar{\Phi}(\bar{\alpha})\} = \{\Phi_1(\bar{\alpha}), \Phi_2(\bar{\alpha}), \dots, \Phi_M(\bar{\alpha})\}^T$ изготавливаемого изделия. В отличие от ранее существующих работ, разработанные математические модели имеют следующие свойства:

- комплексно рассматривается конструкция баллона в целом (днища, цилиндрическая часть, закладные элементы, типы армирующих слоёв и т.д.).
- в используемых обобщённых соотношениях учитывается ленточная модель армирующего материала, позволяющая более точно отражать прочностные ресурсы однонаправленных композитов по сравнению с традиционной нитяной моделью.
- модели являются обобщёнными и могут редактироваться для различных ситуаций, возникающих на производстве.

В четвёртой главе приведены различные подходы к решению задачи синтеза. На основе разработанных математических моделей автоматизированного синтеза процесса намотки для схем, рассмотренных в главе 3, определяется вектор критериев качества (или невязки) $\{\bar{\Phi}(\bar{\alpha})\}$ (M критериев) и вектор параметров управления $\{\bar{\alpha}\}$ (N параметров).

На первой стадии применяется процедура линеаризации с использованием итерационных методов (метод Ньютона и его модификации) для решения системы нелинейных уравнений, построенных относительно функций невязки. Применение данного подхода рекомендуется в случае, когда количество критериев равно количеству параметров, т.е. $M = N$. Задача синтеза формулируется следующим образом. Необходимо отыскать значение вектора параметров $\{\bar{\alpha}^{\oplus}\}$, при которых все невязки системы равны нулю $\{\bar{\Phi}(\bar{\alpha}^{\oplus})\} = \{O\}$, при которых все невязки системы равны нулю.

Данный подход обладает недостатком, связанным с возможностью локализации решения, для которого известно «хорошее» начальное приближение. Как развитие данного подхода, на второй стадии для нахождения минимума обобщённой функции качества предлагается использование методов однокритериальной оптимизации. Итерационный процесс отыскания минимума вектора критериев качества $\Phi_v(\bar{\alpha}) \rightarrow \min; v = \overline{1, M}$ и нахождения рациональных значений параметров начинается с проведения операции нормирования (обезразмеривания) величин, что позволяет привести функции невязки к одному уровню точности. После чего осуществляется аддитивная операция по невязкам соотношений $F(\bar{\alpha}) = \sum_{v=1}^M |\Phi_v(\bar{\alpha})|$, позволяющая вычислить обобщенную невязку, используемую в качестве критерия качества конструкции. Таким образом, задача приводится к поиску минимума целевой функции $F(\bar{\alpha})$. Для решения используется прямой метод СНОС, суть которого заключается в использовании ортогонального сдвига от подмножества уже построенных сопряжённых направлений (СН). Алгоритм работы программы состоит из трёх этапов. На первом этапе первое направление поиска определяется как направление противоположное квазиградиенту целевой функции. На втором этапе конструируются первые N сопряжённых направлений с использованием ортогонального сдвига. Третий этап представляет собой основной итеративный цикл. В этом цикле происходит обновление уже построенных СН с использованием ортогонального сдвига. Недостатком данного подхода является требование наличия хорошего начального приближения и сложность при определении временных затрат на проведение численного счета.

Наиболее сложная проблема возникает в случае отсутствия начального приближения. Данная ситуация появляется при наличии противоречивых требований у участников ЖЦП, которые не удастся согласовать.

Для нахождения решения в данной ситуации в работе дальше предлагается применять многокритериальную оптимизацию с использованием метода ИПП. Поиск множества допустимых и Парето-оптимальных решений осуществляется на основе построения и анализа таблиц испытания. В общем случае, задача автоматизированного синтеза модифицируется и формулируется следующим образом. Заданы математическая модель баллона и пожелания различных участников ЖЦП, определяющие область значений критериев качества изделия $\tilde{\Phi}(\bar{\alpha}) = (\tilde{\Phi}_v^* \leq \Phi_v(\bar{\alpha}) \leq \tilde{\Phi}_v^{**}); v = \overline{1, M}$. Необходимо найти допустимые конструктивные и технологические решения $\bar{\Phi}(\bar{\alpha}^{(i)}) = (\Phi_1(\bar{\alpha}^{(i)}), \dots, \Phi_M(\bar{\alpha}^{(i)}))$, принадлежащие области $\tilde{\Phi}$. При решении определяется множество Парето – оптимальных решений, из числа которых выбирается наиболее предпочтительное решение $\bar{\Phi}(\bar{\alpha}^{(\Phi)})$. Алгоритм многокритериального синтеза процесса намотки, основанный на методе ИПП, представлен ниже (рис. 10÷12).

Этап 1: Участниками ЖЦП определяются:

- границы изменения параметров управления (P_0 параллелепипед в N -мерном пространстве параметров) $\alpha_j^* \leq \alpha_j \leq \alpha_j^{**}; j = \overline{1, N}$ (рис. 10а).

- функциональные ограничения $\bar{f}(\bar{\alpha}) = f_1(\bar{\alpha}), f_2(\bar{\alpha}), \dots, f_k(\bar{\alpha})$ (рис. 10б).

Функциональные ограничения записываются в виде математических и (или) логических равенств и неравенств.

- вектор критериев качества $\bar{\Phi}(\bar{\alpha}) = \Phi_1(\bar{\alpha}), \Phi_2(\bar{\alpha}), \dots, \Phi_M(\bar{\alpha})$ и область целевых значений критериев $\tilde{\Phi}$ (рис. 10в).

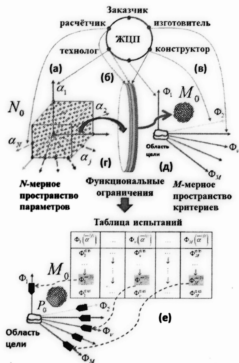


Рис. 10. Этапы 1-3



Рис. 12. Этап 6

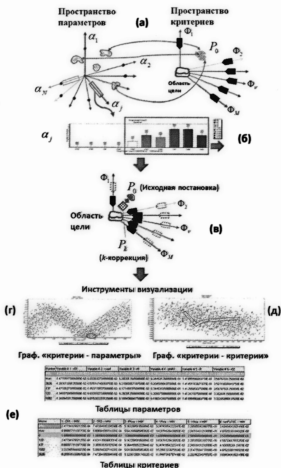


Рис. 11. Этапы 4-5

Этап 2: В параллелепипеде P_0 с помощью ЛП_г – последовательности [Соболь И.М., Статников Р.Б.]: $\bar{\alpha}^{(i)}; i = \overline{1, N_0}$ генерируется N_0 пробных векторов (рис.10а) и осуществляются расчет и проверка $\bar{f}(\bar{\alpha}^{(i)}); i = \overline{1, N_0}$ на функциональные ограничения (рис. 10г).

Этап 3: С помощью M_0 векторов (рис.10в), удовлетворивших ограничениям ($M_0 \leq N_0$), рассчитывается вектор критериев $\bar{\Phi}(\bar{\alpha}^{(i)}); i = \overline{1, M_0}$ и составляется таблица испытаний. В таблице испытаний значения критериев ранжируются в порядке ухудшения (рис. 10д). Используя таблицу испытаний, назначаются допустимые ограничения для каждого критерия $\Phi_v(\bar{\alpha}^{(i)}) \leq \Phi_v^{*(0)}; i = \overline{1, M_0}; v = \overline{1, M}$. На схеме (рис.10е), они помечены жёлтым светом в таблице испытаний и чёрными пятиугольниками на осях критериев. Вектора, удовлетворяющие заданным ограничениям, помечены красными кружками ($P_0 \leq M_0$).

Этап 4: В пространстве критериев P_0 допустимым решениям соответствуют P_0 точек в пространстве параметров (и наоборот) (рис. 11а). Диапазон изменения параметров разделяется на интервалы, каждому из которых ставится в соответствие число допустимых решений, принадлежащих данному интервалу. Красной рамкой (рис. 11б) отмечены расположения допустимых решений.

Этап 5: Оптимизация осуществляется путём коррекции границ вариации параметров, количества генерированных пробных точек и ужесточения критериальных ограничений (этапы 2-4) до тех пор, пока мы либо попадём в область целевых значений $\bar{\Phi}$, либо максимально приблизимся к этой области (k -коррекция). В случае достижения области целевых значений $\bar{\Phi}$ процесс заканчивается.

В противном случае необходимо выяснить причину отсутствия решения и найти приемлемый вариант (рис. 11в), изменяя постановку задачи с привлечением всех участников ЖЦП. При поиске приемлемого варианта оказываются полезными следующие инструменты визуализации:

- графики «критерий - параметр» (рис. 11г), представляющие собой проекции точек $(\Phi_v(\bar{\alpha}^{(i)}), \alpha_j^{(i)}), v = \overline{1, M}, j = \overline{1, N}, i = \overline{1, P_k}$ на плоскости $(\Phi_v, \alpha_j)_k$.
- графики «критерий - критерий» (рис. 11д), сопоставляющие проекции точек $(\Phi_v(\bar{\alpha}^{(i)})), v = \overline{1, M}, i = \overline{1, P_k}$ на плоскости $(\Phi_r, \Phi_s)_k, r = \overline{1, M}, s = \overline{1, M}$.
- таблицы значений критериев и параметров допустимых и Парето-оптимальных решений (рис. 11е), позволяющие определить насколько полученные решения отличаются от требуемых.

Этап 6: Используя инструменты визуализации, повторно решается задача оптимизации с учетом измененных и согласованных с участниками ЖЦП исходных данных. На основе множества найденных Парето-оптимальных решений определяется наиболее предпочтительное решение (рис. 12).

Показано, что комплексное применение выше изложенных подходов для автоматизации процесса синтеза является целесообразным. Использование первого подхода рекомендуется в случае наличия известного хорошего приближения.

Второй подход используется в случае наличия сложных ограничений, ограничения времени синтеза, и необходимости найти, хотя бы одно решение.

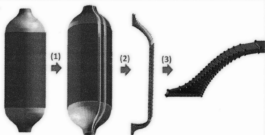
Третий подход используется в наиболее общем случае, связанном с рассмотрением и анализом множества допустимых решений для отыскания согласованного участниками ЖЦП варианта с учетом возможности некорректной исходной постановки задачи.

Пятая глава посвящена изложению разработанной методики автоматизированного анализа НДС композиционного баллона с учётом ограничений, наложенных на смежных этапах ЖЦП. К основным ограничениям при решении задачи анализа композиционных баллонов методом намотки следует отнести: необходимость соблюдения заданных заказчиком параметров баллона, учет конструктивного исполнения соединения композитной оболочки и металлического закладного элемента, а также выполнения требований, накладываемых технологическим оборудованием, используемым на этапе изготовления. В соответствии с данной методикой проектирование конструкции баллона, структуры слоистого материала и проведение расчётов рассматриваются как единая задача. В методике также учтены различные варианты условий закрепления при эксплуатации: а - баллон расположен горизонтально на земле и находится в равновесии, б - баллон закреплён одним концом, в - жёстко закреплены оба конца баллона. Ниже в таблице приведены основные положения предлагаемой методики.

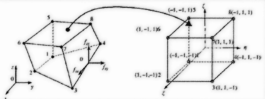
Методика автоматизированного анализа НДС композиционного баллона

Дискретизация конструкции баллона проводится в три этапа:

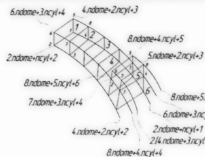
1. Разбиение конструкции на циклические повторяющиеся сегменты.
2. Сегмент аппроксимируется конечно-элементной моделью с использованием гексагональных многослойных элементов.
3. Многослойные элементы разбиваются на монослои.



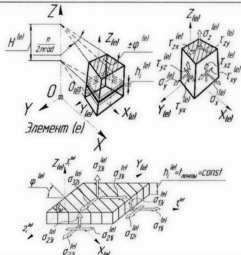
При численном счете по авторской программе используются изопараметрические конечные элементы с тремя степенями свободы в узле.



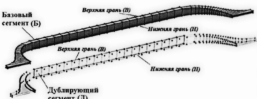
Для глобальной нумерации неизвестных предложен оригинальный способ, позволяющий проводить процедуру в автоматическом режиме. (Здесь $ndome$ и $ncyl$ - количество разбиения на элементы днищ и цилиндрической части, соответственно).



Матрица упругих констант слоистого композита вычисляется с помощью соотношений, описывающих поведение упругих многослойных волокнистых композиционных материалов, деформирующихся в условиях трёхосного напряжённого состояния. Каждый монослой рассматривается как упругое transversально изотропное тело, образованное монослоями. Многослойная среда подчиняется гипотезам Фойхта и Рейсса.



Условия циклической симметрии учитываются с помощью приема дублирующего сегмента. Сборка глобальной матрицы жесткости, учет граничных условий и решение разрешающей системы линейных алгебраических уравнений производится стандартным образом в рамках авторской программы PVRK9.



В шестой главе описаны возможности разработанного автором пакета прикладных программ PVRK9, созданного на основе изложенной методики. Структура пакета показана на рис. 13.

Программы составлены на языке MAPLE и предназначены для использования на персональных электронных вычислительных машинах (ПЭВМ) средней и высокой производительности. Три программы *PVRK9-Syn1*, 2, 3 соответствуют трём подходам к решению задачи автоматизации синтеза, изложенным в главе 4.



Рис. 13. Структура пакета PVRK9

Исходными данными при расчете служат твердотельная модель композиционного баллона, закон армирования и проектная толщина стенки баллона, которые были автоматически получены на этапе проектирования. Программа позволяет проанализировать напряженно-деформированное состояние баллона в трехмерной постановке вдоль произвольного меридиана внешней (или внутренней) поверхности баллона.

На основе пакетов PVRK9 и MOVI в главе 6 были решены комплексные задачи синтеза, проектирования и анализа процесса намотки для двух конкретных случаев производства композитного баллона. В первом случае, по причине использования определенного технологического оборудования, на производство может быть реализована только плоскостная намотка. На основе однокритериальной оптимизации с использованием метода ЧОС, реализованного в программе *PVRK9-Syn2*, находится одно решение. Во втором случае предприятие по той же причине может реализовать траекторию ЛПО. В этом случае на основе многокритериального синтеза, осуществленного в пакете MOVI, программа позволяет найти альтернативный вариант в случае согласования с заказчиком предложенной коррекции исходных данных. Результаты проектирования (с помощью *PVRK9-CAD*) и анализа (с помощью *PVRK9-CAE*) показывают, что конструкция баллона во втором случае оказывается более предпочтительной по сравнению с первым.

Для проверки реализуемости различных траекторий намотки был разработан экспериментальный стенд в лаборатории Дмитровского филиала МГТУ им. Баумана, который показан на рис. 14. Автоматизированное управление экспериментальным стендом осуществляется двухкоординатным электроприводом и устройством числового программного управления. Устройство включает блок привода шпинделя, обеспечивающего вращения оправки вокруг оси намотки и блок привода нитеводителя, обеспечивающего возвратно-поступательного движения раскладчика. Центральный блок содержит микроконтроллеры PIC16F873, которые можно запрограммировать для управления приводами и обеспечения связи с компьютером. В блоках приводов имеются датчики обратной связи для получения информации о координатах и скоростях точек рассчитанных траекторий движения исполнительных органов.

В выводах содержится перечень основных новых результатов работы, ее практической ценности, общие выводы, сведения об апробации и использовании материалов диссертационной работы.

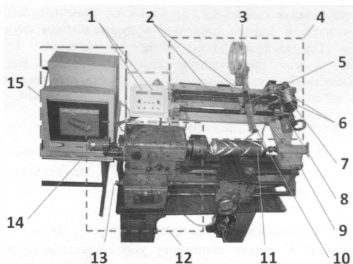


Рис. 14. Общий вид экспериментального стенда: 1 – блоки управления; 2 – рабочие концевики; 3 – бобина для нитеводителя; 4 – блок привода нитеводителя; 5 – стекловолокнистые ленты; 6 – тормозные муфты; 7 – двигатель постоянного тока (для привода нитеводителя); 8 – импульсный датчик (для привода нитеводителя);

9 – задняя бабка; 10 – нитеводитель; 11 – оправка; 12 – блок привода шпинделя; 13 – двигатель постоянного тока (для привода шпинделя); 14 – импульсный датчик (для привода шпинделя); 15 – компьютер

Приложения содержат математическую модель расчёта вектора критериев в задаче синтеза процесса намотки баллона из композитов методом намотки по ЛПО, написанную на языке MATLAB, а также результаты многокритериального синтеза процесса намотки баллона из композитов по геодезической линии, выполненные с помощью пакета программ *PVRK9-syn3*.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны математические модели, позволяющие осуществить процесс автоматизированного синтеза и оптимизацию АСТПП баллонов давления из КМ при: геодезической, плоскостной, ЛПО, равнонапряжённой, равнотолщинной и локсодромой схемах намотки.
2. Разработана комплексная методика автоматизированного синтеза, совместного проектирования и анализа процесса намотки баллонов из КМ, позволяющая контролировать основные параметры всего процесса синтеза изделия и обеспечить совместимости и интеграции АСУП, АСУТП и АСТПП.
3. Разработан пакет прикладных программ *PVRK9* и типовых модулей, обеспечивающих автоматизации и управление ЖЦП баллонов давления из КМ с помощью которого исследованы три реальные комплексные задачи намотки: по плоскостной траектории, по ЛПО и по геодезической линии. По результатам расчета подготовлены рекомендации по реализации данных технологий намотки.
4. Разработан экспериментальный стенд и ПО автоматизации системы управления для намотки модели малогабаритных баллонов из КМ. Проведены испытания с целью подтверждения правильности расчётных данных по определению траекторий раскладки при разных схемах намотки доказавшие возможность реализации данные траектории с использованием рациональных параметров, полученных при решении задачи синтеза.

5. Разработанная интегрированная методика совместного проектирования, автоматизированного синтеза и анализа позволяет в благоприятном случае найти допустимое и Парето-оптимальное множество решений, а в неблагоприятном случае служит инструментом, позволяющим обоснованно корректировать исходные требования, для нахождения приемлемых решений для функциональных и обеспечивающих АСТПП баллонов давления из КМ.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Гаврюшин С.С., Данг М.Х. Синтез композиционного баллона в рамках концепции управления жизненным циклом продукции // II международная конференция «неклассические задачи механики»: сб. науч. тр. (ГУ им. А. Церетели, Кутаиси, Грузия). 2012. С. 326-330.
2. Данг М.Х. Единая автоматизированная система производства композиционных баллонов методом намотки в рамках концепции управления жизненным циклом продукции // Все Материалы. Энциклопедический справочник. 2012. № 9. С. 43-49.
3. Данг М.Х. Разработка автоматизированного комплекса для производства тонкостенных изделий из композиционных материалов методом намотки на базе концепции жизненного цикла продукции // XII Международный симпозиум «Уникальные феномены и универсальные ценности культуры»: сб. науч. ст./ Под ред. В.Н. Ремарчука. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. С. 175-177.
4. Данг М.Х., Гаврюшин С.С. Анализ напряжённо-деформированного состояния композиционного баллона с учётом ограничений, наложенных на этапах проектирования и изготовления // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2012. № 11. С. 63-68.
5. Данг М.Х., Гаврюшин С.С., Семисалов В.И. Анализ и синтез процесса намотки композиционного баллона в рамках концепции управления жизненным циклом продукции // Известия ВУЗов. Сер. Машиностроение. 2012. № 7. С. 12-17.
6. Данг М.Х., Гаврюшин С.С., Семисалов В.И. Метод синтеза процесса намотки баллонов из композиционных материалов в рамках концепции управления жизненным циклом продукции: [Электронный ресурс] // Наука и образование. 2012. (<http://technomag.edu.ru/doc/434726.html>). (Проверено 20.11.2012).