

На правах рукописи

ЕВСТРАТОВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
СВЕРХЛЕГКИХ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНЫХ
БАЛЛОНОВ ДАВЛЕНИЯ**

Специальность **05.07.05**

“ Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных
аппаратов ”

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор -
ВОРОБЕЙ Вадим Васильевич

Официальные оппоненты: ЛЕБЕДЕВ Константин Нитович,
доктор технических наук, профессор,
ОАО «ЦНИИСМ», начальник отделения

БУХАРОВ Сергей Викторович,
доктор технических наук, профессор,
МАТИ - Российского государственного
технологического университета
им. К. Э. Циолковского, заведующий
кафедрой

Ведущая организация: ФГУП «Научно-исследовательский
институт машиностроения», г. Нижняя
Салда

Защита состоится 5 октября 2015г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе Московского авиационного института (национального исследовательского университета), по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского авиационного института (национального исследовательского университета) <http://www.mai.ru/events/defence/>.

Автореферат разослан " ____ " _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д. техн.наук, профессор

Зуев
Юрий
Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В жидкостных ракетных двигателях и двигательных установках применяются баллоны высокого давления, которые служат бортовым аккумулятором газов высокого давления, необходимых для обеспечения работы жидкостного ракетного двигателя и двигательной установки от момента запуска до его останова, в части обеспечения функционирования агрегатов пневмоавтоматики, турбонасосного агрегата, а также для предпусковой и послепусковой продувки полостей агрегатов и трубопроводов двигателя.

Баллоны высокого давления представляют собой полые шары из сваренных друг с другом полусфер. Полусферы изготавливаются штамповкой. В полусферы ввариваются штуцеры для заправки и выхода рабочего газа. Крепление баллонов на двигатель производится с помощью охватывающих сферу хомутов, или за штуцеры, или с помощью привариваемых к сферам крепежных элементов. Баллоны окрашиваются цветом, соответствующим наименованию содержащегося в баллоне газа. Чертежное обозначение и порядковый номер баллона маркируются на его поверхности краской.

На рис. 1 приведена принципиальная пневмогидравлическая схема жидкостного ракетного двигателя без дожигания генераторного газа, из которой видна необходимость использования баллонов высокого давления в целях обеспечения работоспособности изделия, изготовленного по этой схеме.

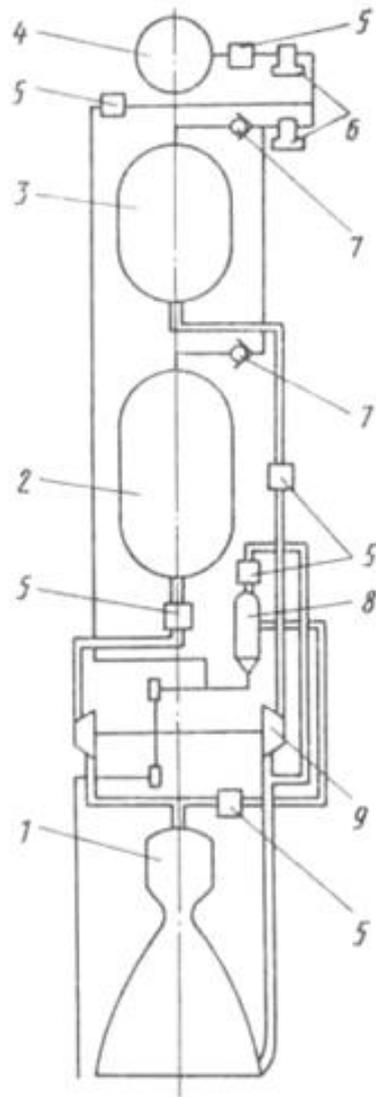


Рис. 1 Схема двигательной установки с насосной системой подачи топлива без дожигания генераторного газа:

1 – камера сгорания; 2 – бак окислителя; 3 – бак горючего; 4 – баллон с газом; 5 – пусковой клапан; 6 – газовый редуктор давления; 7 – обратный клапан; 8 – газогенератор; 9 – турбонасосный агрегат

Целесообразность применения баллонов высокого давления из композиционных материалов была рассмотрена ОАО КБХА в 80 - е годы прошлого столетия в качестве альтернативы по массе стальному баллону с $V = 30$ л, применяемому в качестве аккумулятора давления ($P = 150$ кгс/см²) в двигателе 11Д122 для ракетно-космической системы «Энергия - Буран».

По заданию ОАО КБХА в ОАО «Композит» было спроектировано и изготовлено несколько образцов из органопластика с внутренней резиновой оболочкой. Баллон содержал один штуцер. Испытания показали, что оболочка из органопластика при рабочем давлении растягивается и эластичности внутренней резиновой оболочки оказывается недостаточно для обеспечения герметичности баллона по гелию. Увеличение габаритов баллона под давлением также вызывало проблемы с его закреплением на двигателе.

Работы были прекращены в связи с закрытием темы «Энергия-Буран».

В современной ракетно-космической промышленности шар-баллоны, в которых под большим давлением (от 220 до 340 кгс/кв. см) хранятся газы, используются для работы пневматических систем жидкостных ракетных двигателей. Эти изделия применяют в ракетах типа "Протон", "Ангара-1.2" и "Ангара-А5", в разгонных блоках "Бриз" и "Фрегат" и др.

Во всех фирмах, производящих металлокомпозитные баллоны высокого давления, по-разному подходят к выбору конструкции и технологии изготовления. Поэтому в диссертации поставлена задача: обобщить существующий опыт и разработать основы проектирования и порядок технологических операций изготовления сверхлегких металлокомпозитных баллонов давления (сверхлегкий баллон - герметичная металлокомпозитная конструкция минимального веса).

Задачи исследования

Подробный анализ существующих методов намотки и исследование этапов технологического процесса непрерывной намотки баллонов из композиционных материалов, в том числе технологические способы и схемы намотки, технологические параметры процесса отверждения полимерного композиционного материала, оборудования для намотки.

Исследование определяющих технологических параметров намотки нитью, разработка рекомендаций по расчету, выбору параметров траектории намотки и алгоритмов расчета движения исполнительных органов станка.

Разработка инженерной методики проектирования и расчета силовой оболочки корпуса сверхлегкого баллона на прочность и жесткость.

Разработка комплекса методов проектирования конструкции и технологии производства сверхлегких комбинированных металлокомпозитных баллонов высокого давления.

Анализ результатов отработки стеклопластикового баллона БК-7 и углепластикового баллона БК-8 с использованием различных конструкций и технологий изготовления металлических лейнеров.

Направления исследования

Изучение и обобщение имеющихся сведений проектирования и эксплуатации баллонов, а также основ технологии намотки баллонов из композиционных материалов.

Расчеты основных параметров метода намотки нитью с использованием программного комплекса, а также при помощи ранее изученных теоретических положений.

Проектирование и расчет нагрузки разрушения металлокомпозитных баллонов при помощи программного комплекса.

Экспериментальная реализация разработанного технологического процесса на производстве.

Методы исследования

В работе использованы теоретические методы исследования. Решения задач базируются на экспериментальных данных и известных теоретических положениях технологии машиностроения, теоретической механики, теории сопротивления материалов и математического моделирования. Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью разработанных математических моделей, их адекватностью по известным критериям оценки изучаемых процессов, использованием известных положений фундаментальных наук, сходимостью полученных теоретических результатов с

данными эксперимента и результатами промышленной эксплуатации созданного технологического оборудования, а также с результатами исследований других авторов.

На защиту выносятся

Алгоритм расчета движения исполнительных органов намоточного станка при изготовлении комбинированного облегченного баллона высокого давления.

Инженерная методика проектирования и расчета силовой оболочки корпуса баллона из полимерных композиционных материалов на прочность и жесткость.

Комплексный метод проектирования технологии производства сверхлегких комбинированных металлокомпозитных баллонов высокого давления.

Научная новизна

Анализ и обобщение существующих методов изготовления баллонов из полимерных композиционных материалов и разработка на основе полученных результатов анализа технологии изготовления сверхлегких комбинированных баллонов высокого давления.

Предложено решение для комплексного метода проектирования технологии производства сверхлегких комбинированных металлокомпозитных баллонов высокого давления.

Практическая значимость проведенных результатов исследования

Разработаны методы конструкторско-технологического проектирования сверхлегких баллонов давления для ракетно-космической, авиационной и др. отраслей промышленности.

Вклад автора в проведенное исследование

Автором проведен подробный анализ существующих методов намотки

применительно к изготовлению сверхлегких баллонов давления из композиционных материалов и исследованы этапы технологического процесса непрерывной намотки, в том числе технологические способы и схемы намотки, технологические параметры процесса отверждения полимерного композиционного материала, оборудования для намотки.

Автором исследованы определяющие технологические параметры намотки нитью, разработаны рекомендации по расчету, выбору параметров траектории намотки и алгоритмов расчета движения исполнительных органов станка.

Реализация результатов работы

Результаты работы внедрены на ОАО «Композит» в виде технологической и проектно-конструкторской документации по разработке и созданию сверхлегких и сверхпрочных баллонов давления (заключение экспертной комиссии о состоятельности технологического процесса)

Апробация работы и публикации

Результаты работы были изложены в:

- 1) Доклад на XIII международном симпозиуме имени А.Г. Горшкова «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред», 2007 г.
- 2) Доклад на XIV международном симпозиуме имени А.Г. Горшкова «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред», 2008 г.
- 3) Доклад на XV международном симпозиуме имени А.Г. Горшкова «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред», 2009 г.

По теме диссертации опубликованы две печатные работы в рецензируемом журнале, входящем в перечень ВАК.

Структура и объем

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы из 88 наименований. Объем работы - 151 страница основного текста, включая 64 рисунка и 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, характеризуется новизна результатов и определяется научная и практическая значимость работы.

В первой главе приводится анализ использования баллонов высокого давления в различных отраслях промышленности, обосновываются преимущества применения баллонов в атомной, автомобильной, судостроительной, нефтегазовой и др. отраслях.

На примере отечественных жидкостных ракетных двигателей описываются примеры применения баллонов высокого давления в ракетно-космической промышленности и экономическая обоснованность снижения общей массы разрабатываемой конструкции для вывода полезной нагрузки в космическое пространство.

Вторая глава посвящена изложению и анализу основ технологии непрерывной намотки баллонов из композиционных материалов. Проведено сравнение известных схем намотки и озвучены существующие наиболее известные способы намотки.

Автором проанализировано большое количество схем отечественных и зарубежных установок и станков, примеры которых представлены на рис. 2-рис. 4.



Рис. 2. Намоточный станок тяжелого типа



Рис. 3. Лабораторный станок легкой серии



Рис. 4. Типичная схема исполнения отдельных узлов намоточного станка

По результатам анализа сделан вывод, что движение их исполнительных органов сводится к следующей общей схеме (рис.5):

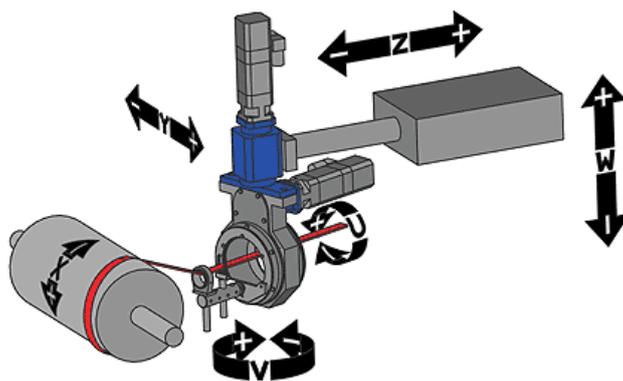


Рис. 5 Движения исполнительных органов:

$\pm x$ – угловая координата, отвечающая за вращательное движение оправки; $\pm y$ – координата, отвечающая за поступательно-возвратное движение центра раскладочной головки вдоль оси вращения; $\pm z$ – координата, отвечающая за поступательно-возвратное движение центра раскладочной головки в плоскости, перпендикулярной оси вращения оправки; $\pm w$ – координата, отвечающая за поступательно-возвратное движение центра раскладочной головки в плоскости, перпендикулярной оси вращения оправки; $\pm u$ – угловая координата, отвечающая за поворот раскладочной головки относительно оси z ; $\pm v$ – угловая координата, отвечающая за поворот раскладочной головки относительно оси w

Рассмотрены различные конструктивные схемы нитетрактов с пропиточными устройствами (рис. 6- 8), устройства хранения и подготовки нити (шпулярники).



Рис. 6. Типовая схема нитетракта



Рис. 7. Типовая схема пропиточного устройства



Рис. 8. Компенсаторы, совмещенные со шпуляриками

На практике, для намотки оболочек вращения, наиболее распространенными схемами станков являются четырехкоординатные ($\pm x, \pm y, \pm z, \pm u$ или w) или трехкоординатные ($\pm x, \pm y, \pm z$) намоточные станки.

Анализируя современные направления в развитии метода намотки, следует отметить, что деятельность большинства зарубежных и отечественных производителей оборудования сконцентрировалась в двух направлениях:

- разработка универсальных станков (в основном для отработки новых изделий) с измененной геометрией рабочей зоны и максимальным оснащением станков дополнительными средствами намотки и выкладочными головками;

- разработка специальных станков (серийное производство) для изготовления изделий определенной геометрии и размеров. В последних, как правило, используют стандартные узлы привода и управления, применяемые при создании различных намоточных устройств.

Таким образом, современные намоточные станки позволяют изготавливать любые емкости (тела вращения) с большой точностью укладки армирующего материала, в том числе комбинированные баллоны высокого давления.

Третья глава посвящена расчету основных параметров реализации метода намотки нитью.

В процессе намотки армирующих нитей на поверхности оправки образуется некоторый рисунок, определяющий схему армирования оболочки будущего изделия.

Если приращение угла поворота оправки $\Delta\varphi = \frac{P}{q}\pi$ ($P, q \in N$) за один шаг (от точки касания геодезической линии с краем оправки $u = \alpha$ до точки касания с краем $u = \pi - \alpha$), то геодезическая линия на рассматриваемой поверхности оправки Σ_0 замкнется через $2q$ шагов. Причем, если $\frac{\Delta\varphi}{2\pi} = m$ (m - целое число), то за один шаг геодезическая линия m раз обходит поверхность Σ_0 и не покрывает всю поверхность Σ_0 рассматриваемой оправки. В случае если $\frac{\Delta\varphi}{\pi}$ - иррациональное число, то геодезическая линия всюду плотно обматывает поверхности Σ_0 .

Таким образом, уравнения этих геодезических линий на поверхности Σ_0 имеют вид:

$$\begin{aligned} \gamma_l^+ : \varphi &= \Phi(u) + 2\Delta\varphi l \\ \gamma_l^- : \varphi &= -\Phi(u) + 2\Delta\varphi l . \end{aligned} \tag{1}$$

Если же $\Delta\varphi$ - иррационально, то куски никогда не совмещаются и вся геодезическая линия всюду плотно обматывает поверхность Σ_0 . Таким образом, рассмотренную модель поверхности Σ_0 можно сколь угодно плотно обмотать одной нитью.

Исходя из данных замечаний, для практической реализации метода намотки в качестве основных параметров, определяющих рисунок намотки оболочки изделия в виде тела вращения, устанавливаются:

ξ - угол охвата лентой оправки при одном возвратном и поступательном ходе раскладочной головки намоточного станка;

m - заходность намотки, т. е. количество возвратно-поступательных движений раскладочной головки к моменту достаточно близкого замыкания траектории намотки;

t - шаг намотки, определяющий некоторое смещение армирующей ленты по окружной координате поверхности (например, смещение по максимальному периметру оправки на ширину ленты, необходимое для равномерного покрытия армирующим материалом всей поверхности оправки).

Очевидно, что угол охвата ξ , заходность m и шаг t намотки (выраженный в радианах между соседними лентами в сечении с координатой $z = \text{const}$) для обеспечения плотной намотки должны быть связаны между собой зависимостью

$$\xi m = 2\pi k \pm t, \quad (2)$$

где k - целое число.

Для обеспечения равномерного распределения лент по поверхности оправки шаг намотки t должен удовлетворять следующему равенству:

$$t = 2\pi / n, \quad (3)$$

где n - число витков ленты в одном слое намотки, реализуемое при условии их равномерного распределения в рассматриваемом сечении.

Очевидно, что число n всегда кратно числу m . Учитывая данное замечание для t , получим, что

$$\xi = \frac{2\pi}{m} \left(k \pm \frac{1}{n} \right). \quad (4)$$

Ввиду того, что k, m, n - целые числа угол охвата ξ является также дискретной величиной.

Для обеспечения достаточно равномерного покрытия оправки наматываемым слоем ленты и минимального отличия реализуемой при намотке траектории ленты от расчетной траектории должно выполняться условие

$$|\xi - \xi_0| = \Delta\xi \leq \lambda.$$

Таким образом, требование равномерного покрытия оправки при намотке слоя или выполнение любого другого требования приводит при реализации исполнительной программы станка к необходимости корректировки в первую очередь нулевых настроек исполнительных органов (положение и размеры раскладывающей головки, количество движений (координат) исполнительных органов и ряд других), расчетной траектории нити на оправке, параметров обеспечения слоя и т.д.

Для намотки слоя в оболочке вращения программа намотки составляется для одного витка ленты. Намотка одного слоя осуществляется путем многократного исполнения программы, продублированной n раз.

При работе станка в общем случае для реализации укладки армирующих нитей или волокон по некоторым заданным траекториям на оправках с поверхностями общего вида используют следующие движения его исполнительных органов: вращательное движение оправки (характеризуется угловой координатой $\pm \xi$); поступательно-возвратное движение центра раскладочной головки вдоль оси вращения оправки (характеризуется координатой $\pm x$); поступательно-возвратное движение центра раскладочной головки в плоскости, перпендикулярной оси вращения оправки (характеризуется координатой $\pm y$); поступательно-возвратное движение центра раскладочной головки в плоскости, перпендикулярной оси вращения оправки (характеризуется координатой $\pm z$); поворот раскладочной головки относительно оси y (характеризуется угловой координатой $\pm \alpha$); поворот раскладочной головки относительно оси z (характеризуется угловой координатой $\pm \beta$).

В настоящем разделе приведены некоторые соображения, касающиеся определения указанных координат исполнительных органов намоточного оборудования.

Предельное отклонение от геодезического направления на поверхности определяется соотношением $|tg\theta| = |tg\theta_{lim}| = k$, где $tg\theta = -\frac{\rho_n}{\rho_g}$.

Здесь ρ_n, ρ_g - радиусы нормальной и геодезической кривизны нити на поверхности.

Учитывая, что:

$$\frac{1}{\rho_n} = \frac{\cos^2 \varphi}{\rho_1} + \frac{\sin^2 \varphi}{\rho_2}, \frac{1}{\rho_g} = -\frac{\cos \gamma}{r} + \frac{d(r \sin \varphi)}{d\varphi}, \frac{1}{\rho_1} = \frac{d \sin \gamma}{dr}, \frac{1}{\rho_2} = \frac{\sin \gamma}{r} \quad (5)$$

из вышеприведенных соотношений получим:

$$tg\theta = \frac{\cos \gamma}{\cos^2 \varphi \frac{d \sin \gamma}{dr} + \sin^2 \varphi \frac{\sin \gamma}{r}} \frac{d(r \sin \varphi)}{r dr} \quad (6)$$

которые определяют траекторию предельного отклонения нити от геодезического направления на рассматриваемой поверхности вращения.

В частных случаях классических поверхностей вращения решения данного уравнения имеют вид:

– цилиндр радиусом R : $\sin \varphi = \frac{R}{(R + kx)}$;

– конус с углом при вершине α : $\sin \varphi = \frac{1}{(Cr \pm kctg\alpha)}$;

– сфера радиусом R : $\sin \varphi = \frac{1}{R} (C \pm k\sqrt{R^2 - r^2})$.

Автором отмечено, что определяющим в данном случае является коэффициент трения k , который может быть изменен благодаря различным технологическим способам в процессе намотки нити.

Определив траекторию на поверхности оправки, основной задачей программирования является задача определения законов движения исполнительных органов станка при наличии ряда установленных ограничений как по устойчивости намотки нити, так и по предельным значениям

перемещений, скоростей и ускорений движения исполнительных органов станка.

Для реализации движения исполнительных органов станка необходимо наличие предварительной информации, получаемой расчетным путем по вышеприведенным зависимостям с учетом геометрических, статических и других ограничений, накладываемых на будущую траекторию укладываемых нитей на заданной поверхности.

В настоящее время одной из наиболее распространенных программ, реализующих алгоритм расчета траекторий намотки, является программный комплекс CADWIN, представленный в удобном для пользователя интерфейсе. Устанавливаются основные размеры геометрии оправки, на базе которых строится форма ее поверхности, задаются параметры наматываемого материала: количество жгутов, их ширина, соотношение связующего и волокнистого материала (коэффициент армирования), линейная и объемные плотности жгутов и связующего. Выбирается тип намотки (спиральная, плоскостная или др.) и задаются некоторые параметры армирования, на базе которых представляется графическое изображение отдельных витков и наматываемого слоя на поверхности.

В соответствии с данными ограничениями представляется графическое изображение процесса намотки с указанием перемещений, скоростей и ускорений движения исполнительных органов станка (рис. 9).

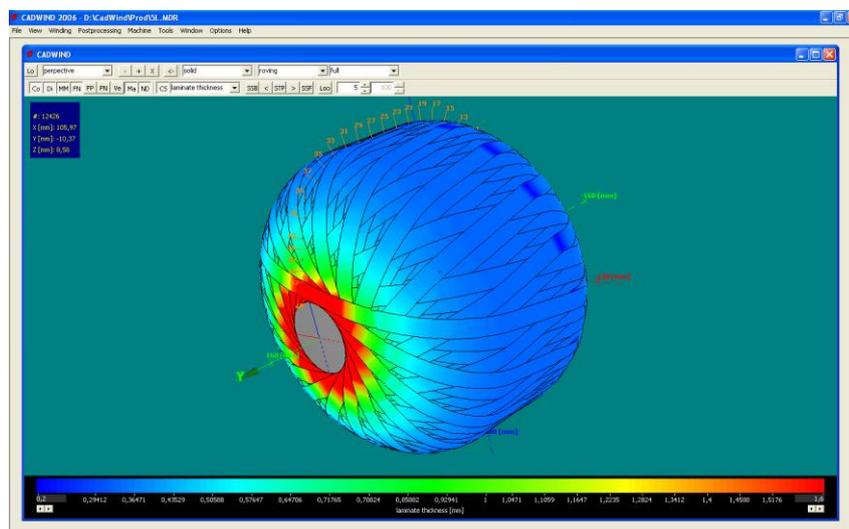


Рис. 9. Графическое отображение настройки

В четвертой главе рассматривается проектирование и расчет силовой оболочки корпуса баллона (прочности, жесткости, технологических аспектов намотки).

Проектировочный расчет баллонов давления, выполненных из композиционных материалов методом непрерывной намотки, сводится к определению проектных параметров конструкции, обеспечивающих удовлетворение следующих условий:

- 1) сохранение требуемой прочности (жесткости) при действии расчетных нагрузок;
- 2) обеспечение минимальной массы проектируемой конструкции;
- 3) технологическая реализуемость.

Основными параметрами баллонов давления, определяемыми в процессе проектирования, являются:

- 1) контуры днищ баллонов;
- 2) распределение углов армирования (углов ориентации армирующих волокон относительно меридиональных линий поверхности баллона);
- 3) количество слоев армирующего материала, образующих силовую оболочку.

При изготовлении силовых оболочек баллонов давления методом непрерывной намотки укладку армирующих нитей на поверхность оправки наиболее целесообразно производить по геодезическим линиям поверхности. Траектория намотки при этом определяется известным соотношением Клеро:

$$r \sin \varphi = const, \quad (7)$$

где: r - радиус оболочки, φ – угол армирования.

Целесообразность такой схемы армирования обусловлена следующими обстоятельствами:

- 1) при геодезической намотке нить, укладываемая на оправку, находится в равновесии даже при сколь угодно малом коэффициенте трения между оправкой и нитью.

2) усилия в нитях, уложенных по геодезическим траекториям, при действии на баллон внутреннего давления оказываются постоянными по длине.

Равенство (7) может быть переписано в следующем виде:

$$r \sin \varphi = r_0 = const \quad (8)$$

Где: r_0 – радиус полюсного отверстия, исходя из условия непрерывности намотки, $\varphi = 90^\circ$. Анализируя последнее соотношение, нетрудно видеть, что геодезическая намотка реализуема только в случае, когда радиусы полюсных отверстий одинаковы. Если же эти радиусы различны (рис. 10), условие (8), очевидно, не выполняется, и траектории укладки армирующих нитей на части баллона будут отличаться от геодезических. Такую намотку принято называть негеодезической.

Поскольку при негеодезической намотке армирующая нить удерживается от соскальзывания с поверхности оправки благодаря силам трения, очевидно, существует минимальное значение коэффициента трения между нитью и поверхностью, обеспечивающее статическое равновесие нити.

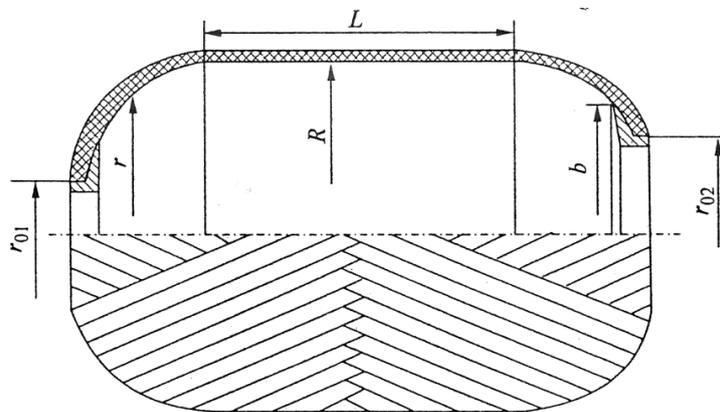


Рис. 10 Схема баллона давления

Для тангенса угла геодезического отклонения:

$$tg\theta = \frac{\xi' r^2}{\xi^2 - \frac{rr''}{1+r'^2}(r^2 - \xi^2)} \quad (9)$$

Оптимальный угол армирования определяется из соотношения уравнения траектории намотки:

$$\xi' = \frac{2(r^2 - \xi^2) \operatorname{tg} \theta}{r^2 - t_0^2} \quad (10)$$

где: ξ - угол охвата лентой из нитей оправки при одном возвратно-поступательном ходе раскладочной головки намоточного станка;

θ - угол между нормалью к поверхности оправки n и нормалью к траектории укладки нити v , называемый углом геодезического отклонения.

r - радиус оболочки

$t_0^2 = r_0^2 - \frac{2q_0 r_0}{p}$ - параметр, определяемый силовыми граничными

условиями по контуру полюсного отверстия. Для днищ, замкнутых в вершине или закрытых крышкой, $q_0 = \frac{pr_0}{2}$ и $t_0 = 0$, а для свободного от нагрузки контура

$$t_0 = r_0;$$

q_0 - погонное осевое усилие, действующее на контуре полюсного отверстия.

Толщина спиральных слоев на экваторе днища рассчитывается по формуле:

$$h_{СПА} = \frac{p(a^2 - r_0^2) + 2q_0 r_0}{2a\bar{\sigma} \cos^2 \varphi_a} \quad (11)$$

где : a - экваториальный радиус днища; p - величина внутреннего давления; q_0 - осевое погонное усилие, распределенное по контуру полюсного отверстия; r_0 - радиус полюсного отверстия; $\bar{\sigma}$ - допускаемое напряжение при растяжении нити; φ_a - угол армирования на экваторе днища.

Толщина кольцевых слоев на цилиндрической части корпуса рассчитывается по формуле:

$$h_K = \frac{pa(2 - \operatorname{tg}^2 \varphi_a)}{2\bar{\sigma}} \quad (12)$$

Из толщины элементарного монослоя h_e определяется количество спиральных и кольцевых слоев $n_{СП}$ и n_K :

$$n_{СП} = \frac{h_{СПА}}{h_e}, n_K = \frac{h_K}{h_e} \quad (13)$$

Определяются фактические толщины спиральных слоев на экваторе днища и кольцевых слоев на цилиндрической части корпуса:

$$h^{\phi}_{СПА} = n_{СП} h_e, h^{\phi}_K = n_K h_e \quad (14)$$

Напряжение в спиральном слое в произвольной точке меридиана днища определяется по формуле:

$$\sigma_{СП} = \frac{pr}{2h_{СП} \cos^2 \varphi} \quad (15)$$

Напряжение в кольцевых слоях материала на цилиндрической части оболочки корпуса определяется по формуле:

$$\sigma_K = \frac{pa - \sigma_{СП} h^{\phi}_{СПА} \sin^2 \varphi_a}{h^{\phi}_K} \quad (16)$$

В рамках жесткостного расчета определяются деформации и перемещения цилиндрической части баллона, деформативность которой существенно превосходит деформативность днищ. Вначале вычисляются жесткости цилиндрической части по формулам:

$$B_{11} = E h^{\phi}_{СПА} \cos^4 \varphi_a$$

$$B_{12} = E h^{\phi}_{СПА} \cos^2 \varphi_a \sin^2 \varphi_a \quad (17)$$

$$B_{22} = E h^{\phi}_{СПА} \sin^4 \varphi_a + E h^{\phi}_K$$

где E - модуль упругости

Осевая и окружная относительные деформации цилиндрической части ε_1 и ε_2 определяются по формулам:

$$\varepsilon_1 = pa \frac{0,5B_{22} - B_{12}}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2}$$

$$\varepsilon_2 = pa \frac{B_{11} - 0,5B_{12}}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2}, \quad (18)$$

где p - величина внутреннего давления.

В пятой главе проводится разработка технологии изготовления сверхлегких комбинированных металлокомпозитных баллонов давления БК-7 и БК-8.

С учетом изложенных расчетно-теоретических результатов разработаны конструктивно-технологические решения и технология изготовления 2-х типов герметичных баллонов давления БК-7 и БК-8 с общими характеристиками – объемом 7 литров.

Геометрические характеристики представлены на рис. 11

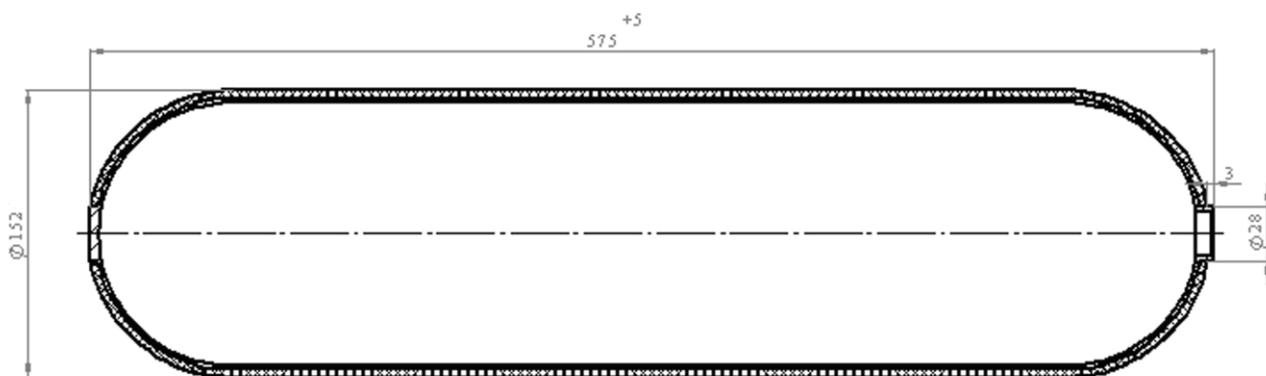


Рис. 11 Геометрические характеристики баллона давления

$$P_{\text{рабочее}} = 300 \text{ кг/см}^2$$

$$P_{\text{разрушения}} \geq 780 \text{ кг/см}^2$$

Требования по цикличности – не менее 10000 циклов.

Первый тип баллона – БК-7, изготовленный на основе цельнотянутого лейнера из стали 12Х3ГНМФБА. Технология изготовления лейнера (вырубка, штамповка, мехобработка, сварка и т.д.) разработана на базе технологии существующего серийного стального баллона БК-5. Силовая оболочка выполнена из стеклоровинга РВМПН 19-1480-80 и связующего ЭД-22, схема намотки: спиральный слой – два кольцевых слоя – спиральный слой – два кольцевых слоя – спиральный слой. Вес баллона- не более 5,5 кг.

Второй тип баллона - БК-8 изготовленного на основе цельносварного лейнера из тонкостенной нержавеющей стали 12ХН10Т. Толщина листа – 0,1 - 0,5 мм. Силовая оболочка выполнена из углепластика Торнелл Т-700 и связующего ЭД-22, схема намотки Х-II-Х-II-Х. Вес баллона - не более 3 кг.

Типовая технология изготовления лейнера представлена на рис. 12.

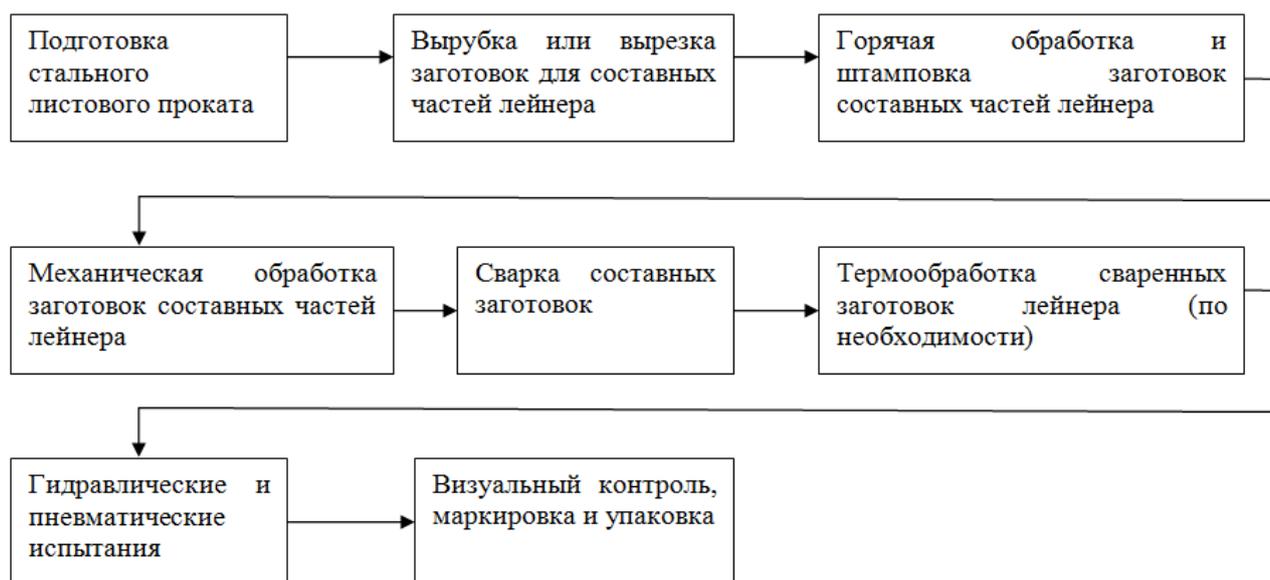


Рис. 12 Типовая технология изготовления лейнера

Для намотки силовых оболочек баллонов спроектирован и изготовлен специальный станок WM2 (рис. 13):

Основные параметры станка:

Габариты: ширина x высота x глубина, мм	2300 x 1300 x 2180
Вес, кг	825
Наибольший диаметр изделия, мм	350
Наибольшая длина изделия, мм	600
Количество регулируемых координат	3
Наибольшая скорость намотки, м/с	2
Максимальное усилие натяжения, кг	3
Максимальный вес изделия, кг	10
Используемая электроэнергия	400В/ 230В/ 50Гц
Установленная мощность, КВА	5



Рис. 13 Намоточный станок WM-2

Технологический процесс изготовления металлокомпозитных баллонов БК-7 и БК-8 является типовым и состоит из следующих операций:

1. Комплектация основных материалов.
2. Входной контроль основных материалов.
3. Подготовка намоточного станка WM2.800.
4. Приготовление связующего.
5. Намотка силовой оболочки.
6. Отверждение силовой оболочки.
7. Выходной контроль по параметру G - масса изделия (кг).

При намотке тонкостенных силовых оболочек БК-8 используется ряд решений. Например, заполнение для повышения жесткости лайнера при намотке водой или воздухом.

При создании облегченного комбинированного композитного баллона с цилиндрическим сверхтонким лайнером сварные швы герметизирующего лайнера выведены из зоны воздействия моментных напряжений, т.е. выведены из изотензоидной (сферической) части баллона в цилиндрическую часть, что позволило значительно уменьшить массу сконструированного баллона

относительно баллонов аналогичного типа. При этом толщина металлического слоя $\delta_{мет.}$ и толщина композитного слоя $\delta_{ком.}$ находятся в соотношении $\delta_{мет.}=(0,1\div 0,2)\delta_{ком.}$

Результаты обработки баллонов БК-7 и БК-8 приведены в табл.1 и на рис.14.

Таблица 1

Результаты испытаний баллона БК-7

№ баллона	Лейнер, вес (кг)	Число слоев	Количество жгутов	Давление разрушения (атм)
1	3,260	3 спир. сл. , 4 кольц. сл.	спир. сл. - 690 кольц. сл. - 1200	807
2	3,093	3 спир. сл. , 4 кольц. сл.	спир. сл. - 690 кольц. сл. - 1200	794
3	2,940	3 спир. сл. , 4 кольц. сл.	спир. сл. - 690 кольц. сл. - 1200	786
4	3,425	3 спир. сл. , 4 кольц. сл.	спир. сл. - 690 кольц. сл. - 1200	818
5	3,333	3 спир. сл. , 4 кольц. сл.	спир. сл. - 690 кольц. сл. - 1200	812
_____//_____	_____//_____	_____//_____	_____//_____	_____//_____
26	3,075	3 спир. сл. , 4 кольц. сл.	спир. сл. - 690 кольц. сл. - 1200	795
27	3,003	3 спир. сл. , 4 кольц. сл.	спир. сл. - 690 кольц. сл. - 1200	790
28	3,377	3 спир. сл. , 4 кольц. сл.	спир. сл. - 690 кольц. сл. - 1200	815
29	3,350	3 спир. сл. , 4 кольц. сл.	спир. сл. - 690 кольц. сл. - 1200	813



Рис. 14. Испытанные баллоны БК-7

В табл. 2 и на рис. 15 результаты испытаний баллона БК-8.

Таблица 2

Результаты испытаний баллона БК-8

№ баллона	Лейнер, вес (кг)	Число слоев	Давление разрушения (атм)	Баллон, вес (кг)
1	1,455	3 спир. , 4 кольц. сл.	783	2,985
2	1,485	3 спир. , 4 кольц. сл.	789	3,023
3	1,437	3 спир. , 4 кольц. сл.	791	2,994
4	1,494	3 спир. , 4 кольц. сл.	808	2,987
5	1,517	3 спир. , 4 кольц. сл.	815	3,124
____//____	____//____	____//____	____//____	____//____
17	1,534	3 спир. , 4 кольц. сл.	820	3,107
18	1,497	3 спир. , 4 кольц. сл.	809	3,025



Рис. 15. Испытанный баллон БК-8

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен подробный анализ и обобщены существующие конструктивные схемы и технологические процессы непрерывной намотки баллонов давления из полимерных композиционных материалов, приведены варианты оборудования для намотки, что позволило выбрать конструктивную схему сверхлегкого баллона - как комбинированного с металлическим лейнером и композитной силовой оболочкой – и наметить пути решения задачи по созданию серийного производства.

2. Разработана методика по созданию программ непрерывной намотки (программируемой укладки бесконечного наполнителя) сверхлегких металлокомпозитных баллонов высокого давления. Исследованы определяющие технологические параметры намотки нитью, позволяющие разработать алгоритм расчета движения исполнительных органов намоточного станка. Для расчета траектории намотки принят программный комплекс CADWIN, удобный для технологов как пользователей интерфейса.

3. Разработана инженерная методика проектирования и расчета силовой оболочки корпуса баллона на прочность и жесткость.

4. Разработаны комплекс конструктивно-технологических решений и технологические процессы производства сверхлегких комбинированных металлокомпозитных баллонов высокого давления.

5. Проведенные мероприятия по созданию технологии и отработке конструкции позволили внедрить в серийное производство два типа сверхлегких герметичных баллона высокого давления БК-7 и БК-8 весом 5,5кг и 3,0 кг соответственно.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Воробей В. В., Евстратов С.В. Новые направления в современной технологии намотки конструкций из композиционных материалов// Вестник Московского авиационного института. - 2009, т. 16, № 1, с. 61- 72.
2. Воробей В. В., Евстратов С.В. Технология изготовления воздухозаборника сверхзвукового самолета методом намотки //Вестник Московского авиационного института. - 2013, т. 20, № 4, с.99- 109.

Статьи в других научных изданиях:

3. Евстратов С.В., Рябцева А.В. Перспективные технологии изготовления металлокомпозитных баллонов давления для ракетно-космической техники. – М.: Изд-во АПК и ППРО, 2012 - 138 с.
4. Воробей В.В., Евстратов С.В. К расчету параметров исполнительных органов намоточного станка// Тезисы доклада 13 международного симпозиума имени А. Г. Горшкова “Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред” - Москва, 2007, с. 64- 65.
5. Воробей В.В., Евстратов С.В. Некоторые соображения о динамических составляющих усилий, возникающих при намотке// Тезисы доклада 14 международного симпозиума имени А. Г. Горшкова “Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред” - Москва, 2008, с. 60- 61.
6. Воробей В.В., Евстратов С.В. Новые направления в технологии нитяной намотки// Тезисы доклада 15 международного симпозиума имени А. Г. Горшкова “Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред” - Москва, 2009, с. 49.

