

---

# Оценка влияния технологических параметров намотки на устойчивость лайнера металлокомпозитного баллона при его изготовлении

А.А. Склезнев, Т.М. Рыжова, А.А. Кузьмин  
АО «ЦНИИСМ», Хотьково

В работе рассматривается лайнер металлокомпозитного баллона, который одновременно с герметизацией баллона выполняет функцию неизвлекаемой технологической оснастки или оправки и должен оставаться неповрежденным как в процессе изготовления металлокомпозитного баллона, так и на этапе его эксплуатации. Одним из параметров процесса автоматизированной намотки, влияющих на характеристики материала и скорость изготовления баллонов, является сила натяжения ленты наматываемого материала, приводящая к возникновению внешнего давления и возможной потере устойчивости лайнера. Приведен алгоритм определения технологических параметров намотки, исключающих потерю устойчивости лайнера, и даны рекомендации по выбору оптимальных параметров изготовления намоткой металлокомпозитных баков.

## Evaluation of the influence of technological parameters of winding on the stability of the metal-composite cylinder liner during its manufacture

A.A. Skleznev, T.V. Ryzhova, A.A. Kuzmin  
JSC "CRISM", Khotkovo, Russia

The paper considers the liner of a metal-composite vessel, which, simultaneously with the sealing of the cylinder, performs the function of a non-removable tooling or mandrel, and must remain intact both during the manufacture of a metal-composite vessel and at the stage of its operation. One of the parameters of the automated winding process that affects the characteristics of the material and the speed of production of vessels is the tension force of the tape of the wound material, which leads to the appearance of external pressure and possible loss of stability of the liner. An algorithm for determining the technological parameters of winding, excluding the loss of liner stability, is given, and recommendations for choosing the optimal winding parameters for manufacturing of metal-composite vessels are given.

---

### 1. Введение

Вопросы создания перспективных летательных аппаратов неразрывно связаны с повышением их весовой эффективности. Композитные баллоны высокого давления в отличие от баллонов, изготовленных из конструкционных материалов на основе металлических сплавов, обладают значительно (до 2–3 раз) более низким весом. В баллоне высокого давления, выполненном с применением армированных полимерных композиционных материалов (КМ), кроме КМ используется изотропный тонкостенный герметизирующий лайнер, представляющий собой тонкостенную оболочку вращения. Композиционный материал используется для обеспечения заданной прочности баллона и воспринимает внутреннее давление содержимого баллона. При намотке с предварительным натяжением на оболочку передается наружное давление, которое может привести к потере устойчивости и герметичности лайнера. На рис. 1 показана форма потери устойчивости оболочки из

термопласта.

В настоящее время при серийном изготовлении металлокомпозитных баллонов высокого давления намоткой (рис. 2) технологические параметры намотки напрямую не увязываются с конструкцией изготавливаемого баллона и требованиями, предъявляемыми к нему. Так, сила натяжения ленты композитного препрега обыкновенно определяется при проведении технологической обработки изделия путем перебора разных значений в ручном режиме, что повышает стоимость разработки новых изделий в силу увеличения трудоемкости и возможного разрушения опытных образцов. Сила натяжения при намотке баллона является важным параметром [1; 2], который, с одной стороны, определяется технологическими возможностями оборудования, а с другой – временем, затраченным на изготовление изделия, и напрямую влияет на себестоимость, трудоемкость и механические характеристики изготавливаемого материала силовой оболочки.



Рис. 1. Форма потери устойчивости изотропного лайнера при намотке системы нитей



Рис. 2. Процесс намотки металлокомпозитного баллона

## 2. Решение поставленной задачи

Моделируя технологический процесс намотки баллона давления, можно сделать вывод, что наибольшие усилия возникают в металлокомпозитном баллоне (и его металлическом лайнере) в кольцевом направлении. Исходя из этого, для моделирования процесса технологической намотки баллона достаточно рассмотреть бесконечную тонкостенную цилиндрическую оболочку, нагруженную внешними силами, вызванными силой натяжения жгута при намотке в кольцевом (окружном) направлении, так как превышение некоторого критического значения напряжений, возникающих в материале лайнера, может вызвать потерю устойчивости конструкции лайнера в кольцевом направлении и, как следствие,

разрушение конструкции баллона давления.

Математическая модель решаемой задачи заключается в следующем. На первом этапе определяется напряжение, возникающее в металлическом герметизирующем лайнере баллона давления в процессе намотки силового композитного слоя ( $\sigma_y$ ), зависящее от толщины оболочки, углов намотки спиральных слоев, толщины спиральных и кольцевых слоев, модулей упругости материалов и собственно силы натяжения ленты композиционного материала. На втором этапе вычислений определяется критическая величина натяжения жгута ( $\sigma_{cr}$ ), которая может привести к потере устойчивости металлического лайнера [3; 4]. Таким образом, вычисляя  $\sigma_y$  для различных расчетных случаев:

– минимальное натяжение, которое обеспечивает работоспособность нитепропиточного тракта намоточного оборудования,  $\sigma_{min} = 0,12$  МПа;

– натяжение с величиной 10...15% от разрушающего натяжения сухой нити,  $[\sigma]_{10...15\%}$  – для обеспечения наилучших характеристик отвержденного материала [1];

– натяжение потери устойчивости металлического лайнера  $\sigma_{cr}$ , по формуле [3]:

$$\sigma_{cr} = \lambda_{cr}^2 D / R^2 h,$$

а затем, производя их сравнение, можно определить наиболее подходящую с конструктивно-технологической стороны задачи силу натяжения ленты композитного материала, которая будет отвечать следующему соотношению:

$$\sigma_{min} < \sigma_y \leq [\sigma]_{10...15\%} < \sigma_{cr}.$$

Описанный алгоритм решения задачи следующий:

- 1) ввод геометрических параметров изделия;
- 2) ввод характеристик используемых материалов;
- 3) вычисление расчетных напряжений в лайнере;
- 4) проверка соотношений и вывод результатов.

Для оценки уровня возникающих напряжений при намотке металлокомпозитных баллонов давления могут быть использованы измерительные системы неразрушающего контроля в режиме реального времени [5]. Для этого в процессе изготовления на поверхность изотропного герметизирующего лайнера и внутрь силовых композитных слоев имплементируются деформационные и температурные датчики на основе оптоволокон с нанесенными решетками Брэгга. Отчет об опыте применения таких систем и технологии обеспечения сохранности выводов датчиков и их работоспособности в процессе изготовления опубликован в работе [5]. При помощи указанных измерительных систем в режиме реального времени можно получать информацию по

---

деформациям изотропного лайнера в процессе намотки композитных силовых слоев, а также в процессе температурного отверждения баллона и далее, на протяжении всех этапов жизненного цикла изделия, включая испытания баллонов и их эксплуатацию.

### 3. Заключение

Предложенный в работе алгоритм расчета технологических параметров намотки позволяет значительно сократить трудоемкость и стоимость создания новых конструкций баллонов давления и снизить расходы на отработку процесса их изготовления, избежав вероятных повреждений тонкостенного герметизирующего лайнера баллонов в процессе автоматизированной мокрой намотки. Кроме этого, с помощью алгоритма может быть определена сила натяжения, приводящая к росту механической прочности готового материала и увеличивающая скорость изготовления металлокомпозитных баллонов давления при помощи автоматизированной намотки.

### Список использованных источников

- [1] Склезнев А.А., Разин А.Ф., Бабичев А.А. Исследование взаимного влияния заготовки изделия из полимерного композиционного материала и технологической оправки друг на друга в процессе изготовления при температурной обработке // Южно-Сибирский научный вестник. 2023. № 1 (47). С. 56–60.
- [2] Мироненко Е.Д., Склезнев А.А., Бабичев А.А. К вопросу обеспечения оптимального натяжения вант композитного бака высокого давления космического аппарата // Вестник «НПО имени С.А. Лавочкина». 2019. № 1/43. С. 66–70.
- [3] Васильев В.В., Салов В.А., Склезнев А.А. Устойчивость бесконечно длинной цилиндрической оболочки под действием наружного давления, создаваемого намоткой гибких нитей // Известия РАН. Механика твердого тела. 2022. № 6. С. 63–71.
- [4] Vasiliev V.V., Salov V.A., Skleznev A.A. Stability of an infinitely long cylindrical shell under the external pressure generated by winding flexible threads // Mechanics of Solids. 2022. Vol. 57, iss. 6. P. 1330–1337.
- [5] Интегрирование волоконно-оптических датчиков в композитный цилиндрический корпус из углепластика, изготовленный способом непрерывной намотки / В.А. Анискович, О.Н. Будадин, С.О. Козельская, Ю.Г. Кутюрин, А.Н. Рыков, А.А. Склезнев, П.И. Гнусин, О.А. Юранев // Контроль. Диагностика. 2022. Т. 25, № 2. С. 16 – 23.