

АРМИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНЫХ БАЛЛОНОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

*Шампиева А.Т.
НИ ТПУ, ИШПР, А4-20,
e-mail: shampiyeva@mail.ru*

Аннотация. Статья посвящена обзору металлокомпозитных баллонов высокого давления: разновидностям, свойствам, характеристикам, схемам армирования (методам намотки). Рассмотрены вопросы оптимизации конструкции баллона на основе результатов конечно-элементного моделирования.

Ключевые слова: металлокомпозитный баллон, тип баллона, метод намотки, схема армирования, лейнер, ровинг.

Abstract. The article is devoted to the review of high-pressure metal-composite vessels: varieties, properties, characteristics, reinforcement schemes (filament winding methods). The issues of vessel design optimization based on the results of finite element modeling are considered.

Keywords: metal-composite vessel, vessel type, filament winding method, reinforcement scheme, liner, roving.

Введение

Баллоны высокого давления широко используются в различных отраслях промышленности, таких как аэрокосмическая, автомобильная, энергетическая и химическая, где безопасное хранение и транспортировка жидкостей или газов под давлением имеет большое значение. Традиционно металлические материалы, такие как сталь и алюминий, были основными для баллонов высокого давления из-за их механических свойств и относительно низкой стоимости.

Баллоны под давлением можно разделить на четыре типа:

- тип 1 полностью изготовлены из металлов;
- тип 2 используют металлический лейнер с композитным армированием только по цилиндрической части баллона;
- тип 3 лейнер армирован полностью;
- тип 4 представляют собой композитные баллоны с неметаллическим лейнером (обычно полимерным) [1, 2].

Металлические баллоны высокого давления типа 1 имеют определенные недостатки, такие как большой вес, склонность к коррозии и ограниченный срок службы из-за усталости металла, поэтому все более широкое распространение получают композитные баллоны.

Композитные баллоны легче в сравнении со стальными баллонами и демонстрируют отличную коррозионную стойкость и высокие усталостные характеристики. Баллоны высокого давления типа 3 и типа 4 могут обладать меньшим весом (на 70 %) по сравнению с баллонами типа 1 [3].

Композитные баллоны высокого давления обычно изготавливаются с использованием метода непрерывной намотки. Метод непрерывной намотки получил широкое распространение в 80-х и 90-х годах XX века. Данный метод основывается на технологическом процессе, при котором непрерывные пропитанные смолой армирующие волокна, называемые ровингами, обматываются вокруг лейнера, образуя композитный материал на его поверхности. Ровингами обычно являются углеродное волокно, стекловолокно или их промежуточные вариации [4–6].

В зависимости от способа нанесения связующего на волокнистый армирующий материал различают мокрую и сухую намотку. В процессе мокрой намотки волокна пропитываются смолой и оборачиваются вокруг вращающейся оправки. Предварительно пропитанные жгуты волокон наматываются на лейнер в сухой или препреговой намотке. Мокрая намотка является более популярной и часто используется для изготовления композитных баллонов.

Мокрая намотка имеет несколько преимуществ перед сухой намоткой в том числе меньшие затраты на материалы и более короткие сроки изготовления изделий. Контроль объема волокна также лучше при мокрой намотке [5]. Выбор волокон и смолы [7] производится в зависимости от требований, предъявляемых к изделию. Широкое применение имеет углеродное волокно. Плотность и высокая прочность на усталость углеродного волокна обеспечивает более длительный срок службы баллона по сравнению с традиционными материалами. Усиленные углеродным волокном баллоны высокого давления типа 3 и 4 могут прослужить до 30 лет без необходимости замены, что вдвое дольше, чем баллоны типа 1 и 2.

В зависимости от типа укладки армирующего волокнистого материала в намотанном изделии различают следующие технологические схемы намотки [5]: прямая (окружная); спирально-винтовая (тангенциальная, кольцевая); спирально-перекрестная (спирально-продольная, спирально-поперечная); совмещенная спирально-кольцевая; продольно-поперечная, косослойная продольно-поперечная; планарная (полносная, орбитальная, плоскостная); тетрамотка; зональная. Прямую намотку можно назвать спирально-винтовой намоткой с большим углом, намотанной под углом 90° (обычно от 85° до 90°). В спиральной намотке значение угла лежит в диапазоне от 0° до менее 90° или от 5° до 85° . Волокна наматываются от полюса к полюсу в совмещенной спирально-кольцевой намотке; угол не является постоянным и зависит от длины оправки. Спиральная обмотка придает радиальную прочность конструкции, в то время как прямая обмотка удерживает кольцевые контуры, обеспечивает устойчивость на концах и участвует в несении осевых нагрузок. Спиральный вид намотки часто используется для изготовления композитных труб и баллонов высокого давления. До достижения желаемой толщины и прочности композита напряжение намотки, угол намотки и качество смолы волокна могут быть изменены в каждом слое армирования. В процессе намотки образуется некоторый рисунок, определяющий схему армирования. Такие рисунки (схемы армирования), в свою очередь, подразделяют на геодезические и негеодезические. Геодезический вид намотки устойчив и не скользит, поскольку ему не требуется внешняя сила, чтобы удержать нити от падения с поверхности лейнера. Негеодезический вид неустойчив, ему требуются силы трения, чтобы удержать нити от соскальзывания с поверхности лейнера. Вследствие этого коэффициент трения становится существенным фактором, поскольку он определяет набор траекторий намотки [5, 8–12]. Схема армирования определяет свойства готового изделия.

Большой угол обеспечивает большее сопротивление сжатию, а малый угол обеспечивает усиленное сопротивление растяжению. Для создания надежного изделия необходимо учитывать различные параметры процесса, их комбинированное воздействие и связанные с этим проблемы (сложность типа модели, переменная толщина, горловина и днище баллона) при проектировании и разработке схем армирования.

Экономические требования определяют актуальность вопросов оптимизации схем армирования для достижения массогабаритного совершенства, определения наилучших параметров конструкций существующих баллонов высокого давления. Оптимизацию баллона высокого давления для минимизации массы и расчета напряженно-деформированного состояния можно выполнить с использованием метода конечных элементов (МКЭ) [13], что позволяет эффективно учесть ориентацию волокон, толщину волокнистого материала, последовательность укладки и количества слоев для различных материалов, таких как стекловолокно и углеродное волокно. Для расчета эффективных упругих характеристик композитов часто используют метод асимптотического осреднения, который в сочетании с методом конечных элементов позволяет вычислять характеристики композитов для любых структур армирования [14]. Существует множество методов многопараметрической оптимизации, которые рекомендуются для поиска оптимальных проектных параметров при разработке нового изделия (метод координатного спуска, спирального координатного спуска, метод Розенброка, поиск по симплексу, метод Хука Дживса с поиском по образцу и др.) [15]. Дальнейшее исследование предполагает численное моделирование за счет комбинирования методов МКЭ и раз-

личных методов оптимизации с учетом эффективных свойств волокнистого материала и достижение снижения массы и повышения допустимого давления.

Список литературы

1. Fryer D.M. et al. High pressure vessels. – Springer US, 1998. – С. 1–10.
2. Семенищев С.П., Килин П.Г. Достижения и перспективы развития в создании мобильных заправщиков природным газом // Транспорт на альтернативном топливе. – 2016. – № 5 (53). – С. 6–9.
3. Гайсин А.А., Билалов Н.Р., Ихсанов Ю.А. Разработка установки для производства баллонов высокого давления для бытовых нужд и автомобильного транспорта // Инновации. Наука. Образование. – 2021. – № 27. – С. 1165–1178.
4. 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. 8–8.
5. Евстратов С.В. 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 / Евстратов Сергей Владимирович. – Москва, 2015. – 151 с.
6. Gemi L., Kara M., Avci A. Low velocity impact response of prestressed functionally graded hybrid pipes // Composites Part B: Engineering. – 2016. – Т. 106. – С. 154–163.
7. Зимин Д.Е., Блазнов А.Н. Физико-химические и реологические основы создания полимерных композиционных материалов для изготовления композитных баллонов на их основе // Ползуновский вестник. – 2018. – № 4. – С. 164–169.
8. Зенцов А.П., Лопарев С.В. Кинематические параметры намотки на цилиндрическую поверхность // Вестник Димитровградского инженерно-технологического института. – 2017. – № 3. – С. 98–101.
9. Образцов И.Ф., Васильев В.В., Бунаков В.А. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов. – М.: Машиностроение. – 1977. – 144 с.
10. Миткевич А.Б., Протасов В.Д. Равновесные стеклопластиковые баллоны давления минимальной массы при негеодезической намотке // Механика полимеров. – 1975. – № 6. – С. 983–987.
11. Zu L., He Q.X., Shi J.P. Semi-geodesics-based dome design for filament wound composite pressure vessels // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Т. 275. – С. 1601–1604.
12. Zu L., Koussios S., Beukers A. Design of filament-wound domes based on continuum theory and non-geodesic roving trajectories // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2010. – Т. 41, № 9. – С. 1312–1320.
13. Склемина О.Ю., Татусь Н.А., Полилов А.Н. Конструирование и прочностной расчет композитных многополостных сосудов давления // XXXII Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения. – 2021. – С. 676–682.
14. Димитриенко Ю.И., Губарева Е.А., Сборщиков С.В. Конечно-элементное моделирование эффективных вязкоупругих свойств однонаправленных композиционных материалов // Математическое моделирование и численные методы. – 2014. – № 2 (2). – С. 28–48.
15. Захарова Е.М., Минашина И.К. Обзор методов многомерной оптимизации // Информационные процессы. – 2014. – Т. 14. – № 3. – С. 256–274.