

УДК 678.017

Применение термопластичных материалов в конструкции сосудов высокого давления для ракетно - космической техники

Каткова Елизавета Дмитриевна

dmkatkova@mail.ru

Виноградова Ирина Константиновна

hhqgrs.bmstu@mail.ru

SPIN-код: 1228-6015

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены материалы, используемые для изготовления баллона высокого давления. Показаны положительные результаты изготовления препрега на основе термопластичного материала. Перечислены возможные методы изготовления конструкций сосудов. Представлен анализ дефектов лейнера, полученного методом аддитивных технологий. Разработан альтернативный метод изготовления внутренней оболочки. По итогам проведенных испытаний, сделан вывод о необходимости проведении дальнейших исследований для отработки использования термопластичных материалов с целью снижения массы и стоимости конструкции сосудов давления.

Ключевые слова: термопластичные материалы, аддитивные технологии, углеродистый препрег, полиэфирэфиркетон, баллон высокого давления, выдувное формование

The use of thermoplastic materials in the construction of high - pressure vessels for rocket and space technology

Katkova Elizaveta Dmitrievna

dmkatkova@mail.ru

Vinogradova Irina Konstantinovna

hhqgrs.bmstu@mail.ru

SPIN-code: 1228-6015

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The materials used for the manufacture of a high-pressure cylinder are considered. The positive results of manufacturing a prepreg based on a thermoplastic material are shown. Possible methods of manufacturing vessel structures are listed. An analysis of liner defects obtained by the method of additive technologies is presented. An alternative method of manufacturing the inner shell has been developed. Based on the results of the tests, it was concluded that further research is needed to test the use of thermoplastics in order to reduce the weight and cost of the pressure vessel structure.

Keywords: thermoplastic materials, additive technologies, carbon fiber prepreg, PEEK, high-pressure cylinder, blow molding

Современные тенденции в области космических исследований направлены на внедрение передовых технологий, которые повышают качество и надежность ракетно-космической техники (РКТ). Современные космические миссии

предъявляют повышенные требования к точности и долговечности конструкций, что стимулирует разработку инновационных методов производства и контроля качества на всех этапах жизненного цикла изделий.

Одной из ключевых задач в производстве РКТ является повышение их массового совершенства. В этом контексте значительный прогресс достигнут благодаря использованию термопластичных композиционных материалов для изготовления баллонов высокого давления (БВД), что позволяет существенно снизить массу конструкции при сохранении высоких показателей прочности и устойчивости к агрессивным внешним факторам.

Полимерно-композиционные баллоны представляют собой перспективное направление в разработке высоконадежных систем хранения и транспортировки газов в ракетно-космических системах. Эти конструкции демонстрируют превосходство по сравнению с традиционными металлическими аналогами, обладая значительно меньшей массой при сохранении высоких прочностных характеристик и устойчивости к воздействию агрессивных сред. Баллоны из полимерно-композиционных материалов способны выдерживать экстремально высокие давления, что делает их незаменимыми в условиях эксплуатации ракетных систем.

Применение полимерно-композиционных материалов не только решает проблему коррозии, характерную для металлических конструкций, но и существенно оптимизирует технологические процессы их производства, обеспечивая повышение эффективности и снижение затрат. Внедрение этих материалов в производство РКТ повышает безопасность и надежность космических миссий, а также расширяет их функциональные возможности.

В данной работе был проведен анализ материалов, применяемых при изготовлении БВД. Особое внимание уделялось изучению физико-механических характеристик и эксплуатационных свойств полимерных и металлических лейнеров, а также композитных силовых оболочек.

В ходе сравнительного анализа оценивались показатели конструктивного совершенства (ПКС) баллонов с различными типами лейнеров и силовых оболочек [1].

Объектами исследования являлись баллоны с лейнерами из полиэтилена (РЕЕК), полиамида-6 (РА6) и нержавеющей стали 12Х18Н10Т. В качестве силовых оболочек рассматривались композитные материалы на основе стеклопластика РВМН-9 с эпоксидным связующим ЭДТ-10, углепластика Т700SC с РЕЕК-матрицей и органопластика «Армос-6» с эпоксидно-фенольным связующим ЭХД-М. Давление изменялось в диапазоне от 15 МПа до 35 МПа, объем баллона принят равным 25 л, диаметр баллона — 244 мм.

Было выявлено, что для любой комбинации материалов наибольший ПКС обеспечивается использованием углепластика в качестве обмотки. Наибольшей массой обладает баллон, лейнер которого выполнен из стали 12Х18Н10Т. Использование РЕЕК и РА6 в качестве материала не дают существенного различия, но они обеспечивают больший ПКС, чем при использовании 12Х18Н10Т.

Проведя анализ, можно сделать вывод о том, что материалом, отвечающим все физико-химическим характеристикам, для изготовления БВД является полиэфирэфиркетон. РЕЕК находится на вершине пирамиды термопластов и является высоко конструкционным кристаллизующимся термопластом, обладающим высокой термостойкостью, механической прочностью и химической устойчивостью [2]. Высокие температуры стеклования и плавления позволяют данному полимеру длительное время находиться в высокоэластичном состоянии и не переходить в стадию деструкции.

Проанализировав литературу, в качестве связующего для углеродного волокна был выбран РЕЕК. Термопластичное связующее позволяет повысить коэффициент использования материала, а также увеличивает жизнеспособность препрегов на их основе. Производство термопластичных лент из углеродного волокна и РЕЕК возможно методом экструзии.

Были проведены лабораторные экспериментальные исследований по анализу смачивания расплавом РЕЕК углеродного волокна, а также сконструирована и изготовлена оснастка для получения консолидированной пластины из данных материалов методом ламинирования. При изучении внутренней структуры изготовленного образца было отмечено равномерное распределение полимера по армирующему волокну. Визуальный осмотр поверхности ленты показал отсутствие дефектов, таких как трещины, поры или неровности. Поверхность пластины выглядит гладкой и однородной.

Препрег, полученный данным способом, отличается высокой прочностью, жесткостью и устойчивостью к высоким температурам. Это делает его подходящими для применения в таких отраслях, как авиастроение, автомобилестроение и производство электроники [3].

В рамках данного исследования рассмотрена технология FDM-печати как перспективный метод изготовления лейнера БВД. Для отработки режимов печати было изготовлено 10 образцов из ПЭЭК методом FDM-печати с варьированием температуры экструзии (430–450 °C) и толщины слоя (0,1–0,15 мм). Испытания на трехточечный изгиб (ISO 178) показали, что максимальная прочность достигается при 450 °C и толщине слоя 0,15 мм ($\sigma_{\max} = 69,9$ МПа).

Тесты на растяжение выявили влияние термообработки, ориентации печати и охлаждения: вертикальная печать и снижение обдува улучшают механические свойства. Газопроницаемость ПЭЭК оценивали газохроматографически. Образцы в виде шайб тестировали в диффузионной ячейке при подаче $\text{He} + \text{CH}_4$ и $\text{He} + \text{O}_2$. Материал показал газонепроницаемость до 4 атм для CH_4 и 2,5 атм для O_2 . Томография образца лейнера, напечатанного по результатам эксперимента, показала наличия большого количества пор, а также разнотолщинность в зоне швов, образованных в ходе печати. Томография цилиндрической части лейнера изображена на рис. 2.

Как альтернативный метод производства лейнера БВД было выбрано выдувное формование. Это процесс производства включает в себя две основные стадии: первоначальное формование трубчатой заготовки (преформы) и последующее ее раздувание [4]. Схема выдувания полого изделия представлена на рис. 3.

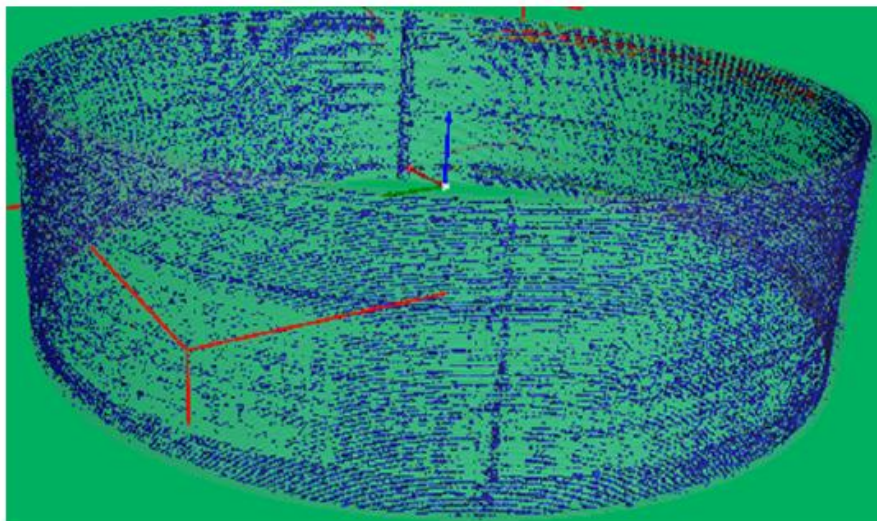


Рис. 2. Томография цилиндрической части лейнера, изготовленного методом FDM-печати

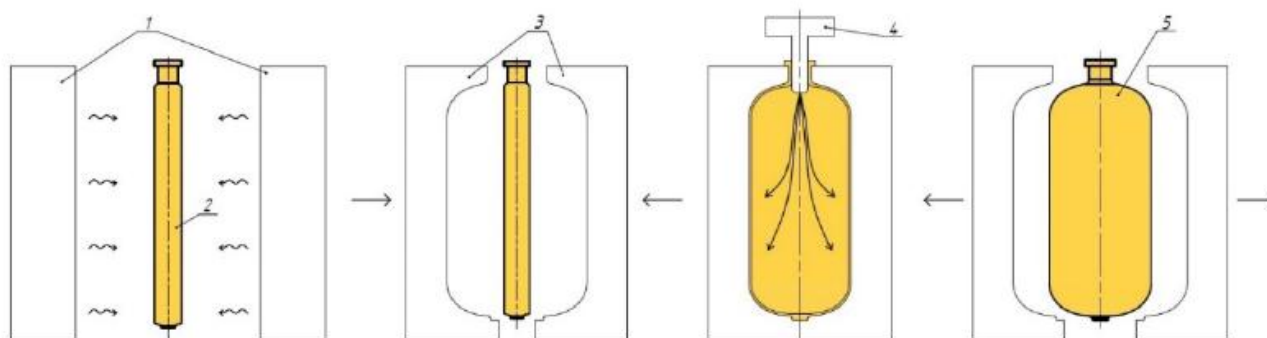


Рис. 3. Схема выдувного формования баллона:

1 — нагреватель; 2 — преформа; 3 — форма для выдувания; 4 — раздувной дорн; 5 — баллон

Форма преформы для выдувания лейнера имеет форму колбы. При раздуве заготовки конфигурация и размеры горловины (штуцера) остаются неизменными. Одной из наиболее важных характеристик преформы являются масса и толщина стенки, так как от этого зависит емкость получаемого изделия. Для дальнейшей деформации преформы требуется перевести материал в высокоэластичное состояние, т. е. нагреть полимер выше температуры стеклования, но ниже температуры плавления.

В рамках данной работы было изготовлено 4 макета лейнера. Две преформы были нагреты выше температуры стеклования на $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, остальные — на $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для отработки процесса выдувного формования лейнера был выбран термопластичный материал — РА6. Данный полимер в технологическом плане ведет себя аналогично РЕЕК, а также имеет схожие механические характеристики, но является менее термостойким и имеет более низкую температуру переработки.

Результатами эксперимента являются повторяющиеся дефекты, а именно разрыв стенки преформы, что говорит о том, что температура нагрева не является ключевым фактором в возникновении данных дефектов. Причина свя-

зана с конструктивными особенностями преформы, а также условиями ее формования и охлаждения.

Для создания силовой оболочки используется метод намотки. Намотку разделяют на «мокрую» и «сухую». Выбранный нами экструзионный метод получения препрега из углепластика T700SC+PEEK подразумевает «сухой» способ намотки.

Для лучшей скрепления волокон препрега используют нагрев зоны с помощью горелки, ролика и лазера. В рамках работы была выбрана роботизированная намотка ленты с лазерным нагревом зоны [5].

Автоматическая выкладка сухой углеродной ленты является одним из самых передовых методов изготовления конструкций из полимерно-композиционных материалов. Главное преимущество этого метода — возможность укладывать непрерывную углеродную ленту под любым углом на поверхность оснастки, которая формирует изделие. Это позволяет создавать изделия сложной формы с максимальной прочностью и минимальным весом.

Применение автоматических систем с ЧПУ обеспечивает точность, повторяемость и контроль процесса, что повышает производительность и качество работы.

К ключевым параметрам, которые контролируются при автоматизированной выкладке с лазерным нагревом зоны, относятся температура и натяжение материала, скорость укладки, давление при прикатывании и точность заданной траектории.

Внедрение баллонов из полимерно-композиционных материалов в конструкции РКТ открывает новые горизонты для оптимизации массы и объемов изделий, что, в свою очередь, способствует повышению эффективности летательных аппаратов. Разработка и внедрение новых технологий и материалов поможет расширить горизонты космических исследований и улучшить их эффективность, делая их доступными для широкой аудитории.

Список источников

- [1] Бабурин М.А., Баданина Ю.В., Баскаков В.Д. и др. *Технологическое проектирование оболочек баллонов и трубопроводов минимальной массы из комбинированных материалов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019, 74 с.
- [2] Фитерман С.И., Шарафутдинов Э.Р., Онегов Н.А., Руднев Н.А. Обзор свойств и способов получения полиэфирэфиркетона. *Нефтегазовое дело*, 2024, № 2, с. 167–194. URL: https://ogbus.ru/files/ogbus/issues/2_2024/ogbus_2_2024_p167-194.pdf (дата обращения 15.06.2025).
- [3] Кирин Б.С., Сорокин А.Е., Бойчук А.С. Углепластик на основе полиэфирэфиркетона. *Труды ВИАМ*, 2020, № 4–5 (88). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-45-22-31>
- [4] *Технологии производства изделий из пластмасс. Ч. 1*. Нижний Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2018, 33 с.
- [5] Brasington A., Sacco Ch., Halbritter J. Automated fiber placement: A review of history, current technologies, and future paths forward. *Composites Part C: Open Access*, 2021, vol. 6. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100182>