



Научная статья
05.16.09 – Материаловедение (по отраслям), технические науки
УДК [621.744+621.778.2]:624.016
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.020

БАЛЛОНЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Виктор Борисович Маркин ¹, Наталья Андреевна Мягкова ²

^{1,2} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия
¹ mvb1942@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7731-3895>
² kafedra-n@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9046-2852>

Аннотация. Применение газовых топливных систем позволит решить ряд экологических задач, стоящих перед автомобилестроением, существенно сократить расходы потребителей на топливо и увеличить ресурс двигателя. Основой такой модернизации следует считать разработку, расчет, конструкторскую привязку и технологическую обеспеченность производства баллонов давления как емкостей для сжатого или сжиженного природного газа. С целью снижения веса баллонов предпочтение отдается полимерным композиционным материалам, использующим в технологии изготовления методы намотки армирующих волокон, совмещенных с полимерным связующим.

Ключевые слова: баллоны давления, композиционный материал, армирующие волокна, полимерное связующее, лайнер, топливная система, экономическое обоснование.

Благодарность: авторы выражают признательность за финансовую поддержку исследования РФФИ и Администрацией Алтайского края в рамках научного проекта «Физико-химические основы создания и исследований композиционных материалов и технологии изготовления композитных баллонов давления на их основе», №18-48-220008-р-а.

Для цитирования: Маркин, В. Б., Мягкова, Н. А. Баллоны высокого давления для газотопливной системы из композиционных материалов // Ползуновский вестник. 2021. № 4. С. 151–156. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.020.

Original article

COMPOSITE HIGH PRESSURE CYLINDERS MATERIALS

Victor B. Markin ¹, Natalia A. Myagkova ²

^{1,2} Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia
¹ mvb1942@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7731-3895>
² kafedra-n@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9046-2852>

Abstract. Use of gas fuel systems will allow to carry out the ecological tasks facing the Russian automotive industry, it is essential to cut down expenses of consumers on fuel and to increase an engine resource. As a basis of such modernization it is necessary to consider development, calculation, a design binding and technological security of production of cylinders of pressure as capacities for the compressed or liquefied natural gas. For the purpose of weight reduction of cylinders the preference is given to the polymeric composite materials using methods of winding of the rein.

Keywords: pressure cylinders, composite material, reinforcing fibres, polymer binder, liner, fuel system, economic justification.

Acknowledgements: the authors express their gratitude for the financial support of the RFBR research and the Administration of the Altai Territory within the framework of the scientific project "Physico-chemical foundations for the creation and research of composite materials and technology for the manufacture of composite pressure cylinders based on them", No. 18-48-220008-r-a.

For citation: Markin, V. B. & Myagkova, N. A. (2021). Composite high pressure cylinders materials. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 151-156. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.020.

© Маркин, В. Б., Мягкова, Н. А., 2021

ВВЕДЕНИЕ

Российское автомобилестроение развивается по нескольким направлениям: осуществление сборки известных марок зарубежных автомобилей и выпуск новых моделей отечественных автомобилей, например, серии Лада (Lada Kalina, Lada Priora, Lada Granta, Lada Vesta, Lada Largus). Одним из путей повышения конкурентоспособности российских автомобилей является улучшение экологических характеристик и снижение затрат на топливо. Данное направление можно развивать без крупных затрат на закупку новых технологий и оборудования, расширения объемов продаж, используя переход на новые потребительские качества и выполнение ограничений по выбросам опасных газообразных продуктов. Обозначенные выше направления совершенствования возможны за счет применения газобаллонной аппарату-

ры с баллонами давления из композиционных материалов.

Преимущество газового топлива заключается, прежде всего, в том, что оно сгорает полнее бензина, поэтому концентрация окиси углерода и других газов в выхлопе автомобиля существенно ниже, чем в выхлопе бензинового автомобиля (рисунок 1).

Кроме того, сжатый природный газ в несколько раз безопаснее бензина в процессе эксплуатации, а также и взрывоопасного сжиженного газа (пропан-бутана). Он легче воздуха и в случае утечки улетучивается, при этом максимально допустимая концентрация газа в воздухе, необходимая для инициирования взрыва, составляет от 5 до 18 процентов, а для бензина этот показатель составляет 70 процентов, что говорит о невозможности взрыва больших масс газа в случае утечки внутри автомобиля.

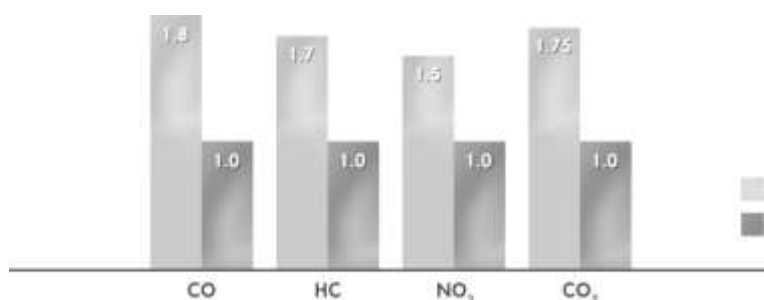


Рисунок 1 – Сравнение выбросов CO, HC, NO₂ и CO₂ при использовании бензина (1) и газа (2)

Figure 1 - Comparison of CO, HC, NO₂ and CO₂ emissions when using petrol (1) and gas (2)

На фоне развивающегося в настоящее время использования гибридных и электромобилей следует считать, что сжатый и сжиженный природный газ остаются топливом будущего. Уже сегодня создаются максимальные условия для распространения этого вида топлива повсеместно. Эта тенденция существует и в Европе, которую волнуют две проблемы: экологичность топлива и его экономичность. Для развития рынка газомоторного топлива в России существуют благоприятные предпосылки: газотранспортная система, невысокая стоимость природного газа по сравнению с традиционными видами топлива и, наконец, большие запасы газа.

На сегодняшний день можно констатировать, что в Российской Федерации существует производство автомобилей, двигатели которых работают на альтернативных видах топлива (Lada Vesta CNG и Lada Largus CNG). Среди таких видов топлива наиболь-

ший интерес представляет природный газ (метан), который имеет достаточно низкую себестоимость, его цена более привлекательна по отношению к традиционным видам топлива, а энергетическая эффективность в сравнении с бензином АИ95 соответствует значениям АИ140 (например, одному литру бензина с октановым числом АИ92 соответствует примерно 0,8 м³ сжатого газа с октановым числом АИ140). Следовательно, применение в качестве топлива природного сжатого газа позволяет решать несколько задач: повысить экологические характеристики отечественных автомобилей, резко от 3-х до 10 раз сократить расходы потребителей на топливо, в 1,5–1,8 раз увеличить ресурс двигателя.

Существует ряд требований к технологии изготовления баллонов высокого давления. Баллоны для природного компримированного газа, используемого в качестве топ-

лива для транспортных средств, должны быть максимально легкими и в то же время соответствовать требованиям безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. Поэтому для эффективной работы конструкции баллона давления необходим правильный подбор материала и технологии его изготовления. При их выборе следует руководствоваться принципом оптимальности и рассматривать не только существующие материалы, но и возможность их модернизации, а также возможность создания новых материалов, которые будут спроектированы под конкретно заданные условия работы.

Для производства баллонов высокого давления необходимо решение следующих задач:

- исследование напряженно-деформированного состояния баллонов;
 - подбор связующего и армирующего наполнителя для композитной оболочки баллона высокого давления;
 - оптимизация конструкции баллона по форме и массе с изменением технологии изготовления;
 - подбор технологии модификации компонентов с целью улучшения качества адгезионного взаимодействия;
 - подбор технологических параметров изготовления оправки для намотки силовой оболочки баллона;
 - подбор технологических параметров процесса намотки, пропитки и полимеризации композитного слоя баллона высокого давления;
 - анализ основных технико-экономических показателей производства баллонов высокого давления, а также его себестоимости;
 - анализ экологической безопасности технологического процесса изготовления баллонов.
- Исходя из условий работы, к конструкции баллона давления из композиционных материалов предъявляется ряд требований:
- обеспечение безопасной эксплуатации;
 - удовлетворение прочностных характеристик;
 - обеспечение оптимальности, при которой целевой функцией выступает минимизация массы баллона давления;
 - технологичность конструкции, которая подразумевает под собой взаимосвязь и взаимообусловленность изделия, технологии производства, условий хранения и эксплуатации.

Общеизвестно, что полимерные композиты негерметичны, поэтому конструкции из них в зависимости от уровня исходных тре-

бований включают в себя дополнительные герметизирующие слои, оболочки и т.п. Герметизирующую оболочку (лейнер), как правило, используют в качестве оправки для намотки слоев силовой оболочки.

Оригинальные конструкторско-технологические решения, положенные в основу создания герметичной полимерной оболочки (лейнера), усиленной стекловолокном (или углеродным волокном), позволяют снизить массу баллонов в 5 раз по сравнению с металлическим, повысить коррозионную стойкость, устойчивость к воздействию агрессивных сред, пожарную и взрывобезопасность и гарантировать безосколочность разрушения. Циклическая долговечность – более 15000 циклов нагружения, коэффициент запаса прочности после проведения циклических испытаний – не менее 2,6; рабочий интервал температур – от минус 40 °С до плюс 80 °С; срок службы – не менее 10 лет.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Проектировочный расчет газового баллона сводится к определению проектных параметров конструкции, обеспечивающих удовлетворение следующих условий:

- минимальная масса проектируемой конструкции;
- сохранение требуемой прочности и жесткости при действии расчетных нагрузок;
- технологическая реализуемость;
- обеспечение минимальной стоимости баллона.

Основными параметрами баллона, определяемыми в процессе проектирования, являются:

- контуры днищ оболочки;
- распределение углов армирования волокном;
- количество слоев армирующего материала, образующих силовую оболочку.

Основные нагрузки, возникающие в баллоне под действием внутреннего давления, приведены на рисунке 2, а зависимость формы контура баллона при различных значениях параметра λ , определяющего форму меридиана оптимальной оболочки, – на рисунке 3.

Приведенные зависимости используются на начальном этапе проектирования при определении геометрических характеристик оптимального баллона, которые на следующем этапе позволяют установить характеристики прочности и жесткости по величине максимального эксплуатационного давления P , составляющего 29,4 МПа.

Напряжения в кольцевых слоях материала на цилиндрической части оболочки определяются по соотношению, связывающему внутреннее давление (p) и его вклад в спиральную составляющую силовой оболочки толщиной $h_{СП}$ и кольцевой составляющей h_K :

$$\sigma_K = \frac{pa - \sigma_{СП} h_{СП}^{\phi} \sin^2 \varphi a}{h_K^{\phi}}$$

Здесь φ_a – угол армирования на цилиндрической части оболочки радиусом a .

R – радиус цилиндрической части баллона

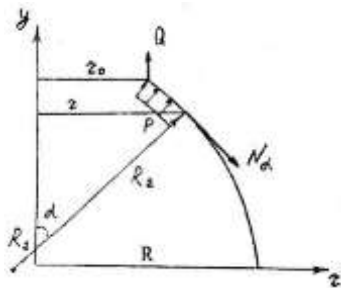


Рисунок 2 – Распределение нагрузок в силовой оболочке в зависимости от координат:

- P – внутреннее давление;
- R_1, R_2 – главные радиусы кривизны оболочки;
- Q – осевая сила;
- R – радиус цилиндрической части баллона

Figure 2 - Distribution of loads in the force shell depending on the coordinates: P - internal pressure; R_1, R_2 are the main radii of curvature of the shell; Q - axial force; R - radius of the cylindrical part of the cylinder

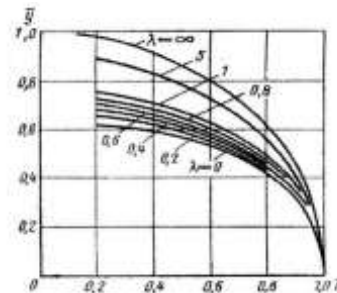


Рисунок 3 – График зависимости формы контуров баллона при различных параметрах λ для угла укладки волокна на экваторе $\varphi = 7^\circ 49'$: \bar{y} и \bar{z} – безразмерные координаты, отнесенные к величине радиуса экватора R

Figure 3 - Graph of the dependence of the shape of the balloon contours at various parameters λ for the angle of the fiber at the equator $\varphi = 7^\circ 49'$: \bar{y} and \bar{z} - dimensionless coordinates related to the value of the equatorial radius R

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изготовление композитных баллонов высокого давления проводилось методом «мокрой» намотки армирующих волокон: стеклянных (стеклоровинг РВМН 19-1480-80), углеродных (жгут «Торнел Т700»), базальтовых (ровинг НБР-19-1200-КВ42), совмещенных с эпоксидным связующим ЭДУ на металлический или пластиковый лейнер. Для намотки использовался намоточный станок WM2.800 (рисунок 4). Отверждение изделий проводилось по стандартной методике с применением автоматизированной системы управления тепловым процессом [5].

На рисунке 5 приведены фотографии металлокомпозитных баллонов БК-7 до испытания (а) и после разрушения (б) при трехкратном превышении внутреннего давления.

Одновременность создания материала и конструкции из полимерных композитов определяют необходимость серьезной материаловедческой проработки, использования самых передовых методов модификации ма-

териалов на уровне компонентов, а также исследования структурообразования, направленного на оптимизацию свойств материала в конструкции.



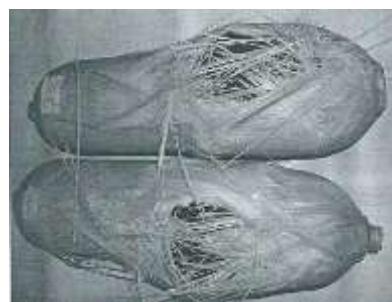
Рисунок 4 – Технологический процесс спиральной намотки баллонов давления

Figure 4 - Technological process spiral wound pressure cylinders

БАЛЛОНЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ



а)



б)

Рисунок 5 – Металлокомпозитные баллоны высокого давления до разрушающего испытания (а) и после испытания при давлении 80 МПа (б)

Figure 5 - High pressure metal composite cylinders before destructive test (a) and after testing at pressure 80 MPa (b)

В таблице 1 представлены данные по композитным баллонам высокого давления, в которых использовались металлические и пластиковые лейнеры, а силовые оболочки

были выполнены из стеклопластика, углепластика и базальтопластика. Баллоны рассчитаны на рабочее давление 29,4 МПа.

Таблица 1 – Результаты испытания композитных баллонов высокого давления

Table 1 - Results of testing composite high pressure cylinders

| Лейнер | | Силовая оболочка | Давление разрушения, МПа |
|--------------|-----------|------------------|--------------------------|
| Материал | Масса, кг | | |
| Сталь | 1,5 | Углепластик | 81,0 |
| Сталь | 1,5 | Стеклопластик | 78,0 |
| Сталь | 1,5 | Базальтопластик | 80,0 |
| Полипропилен | 0,4 | Стеклопластик | 65,0 |

ВЫВОДЫ

Масса композитных баллонов с металлическим лейнером не превышает 3 кг. При использовании в качестве силовой оболочки углепластика масса баллона снижается до 1,8 кг при том же рабочем давлении 29 МПа.

Металлокомпозитные баллоны высокого давления имеют практически трехкратный запас прочности, что позволяет повысить срок их эксплуатации до 10 и более лет при обязательном контроле и обслуживании. Характер разрушения баллонов при достижении критического давления безосколочный.

Экономическая эффективность применения композитных баллонов для газотопливных автомобильных систем определяется двумя основными критериями: количеством продаж автомобилей и стоимостью топлива. Переход на двухтопливную систему

имеет ряд предпосылок для развития газомоторного рынка:

- низкая себестоимость метана, его привлекательная цена относительно традиционных видов топлива и значительные запасы природного газа (метана) в России;
- нестабильная ситуация на нефтяном мировом рынке;
- природный газ менее взрывоопасен по сравнению со сжиженным газом;
- применение природного газа снижает темпы износа двигателя;
- существенное снижение массы баллона и повышение его рабочего давления.

Таким образом, полимерные композиционные материалы находят все большее применение в современном машиностроении, способствуют значительному снижению металлоемкости и материалоемкости изделий и конструкций. Можно считать эти материалы материалами XXI века, соответствующими уровню пятого технологического уклада.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Газ топливный компримированный для двигателей внутреннего сгорания. Технические условия: ГОСТ 27577-20007. Введ. 2002-01-01. М. : Изд-во стандартов, 2002. III. 8 с.
2. Усошин В.А., Семенюга В.В. Современные тенденции проектирования и производства баллонов для компримированного природного газа // Национальная газомоторная ассоциация. 2001. № 4. С. 5–14.
3. Воробей В.В., Маркин В.Б. Основы проектирования и технология сверхлегких композитных баллонов высокого давления : монография. Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2014. 166 с.
4. Воробей В.В., Маркин В.Б. Основы технологии и проектирование корпусов ракетных двигателей. Новосибирск : Наука, 2003. 164 с.
5. Маркин В.Б., Сагынганова И.К. Организация конвейерного выполнения задач в распределенных автоматизированных системах управления тепловых пунктов // Известия национальной академии наук Республики Казахстан. 2019. №1. С. 63–67.
6. Блазнов А.Н., Маркин В.Б. и др. Перспективы создания композитных баллонов // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности : материалы XI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. 2018. С. 80–88.
7. Маркин В.Б., Ананьева Е.С., Новиковский Е.А. Композиционные материалы в современном машиностроении // Central-Asian Material Science Journal. № 1. 2015. С. 45–50.

Информация об авторах

В. Б. Маркин – доктор технических наук, профессор, руководитель Учебно-научно-производственного центра «Композит» Алтайского государственного технического университета.

Н. А. Мягкова – кандидат экономических наук, доцент кафедры «Экономика и производственный менеджмент» Алтайского государственного технического университета.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Статья поступила в редакцию 26.10.2021; одобрена после рецензирования 14.11.2021; принята к публикации 26.11.2021.

The article was received by the editorial board on 26 Oct 21; approved after reviewing on 14 Nov 21; accepted for publication on 26 Nov 21.

REFERENCES

1. Compressed fuel gas for internal combustion engines. Specifications. (2002). HOST 27577-20007. Moscow : Publishing house of standards. (In Russ.).
2. Usoshin, V.A. & Semenyuga V.V. (2001). Modern trends in the design and production of cylinders for compressed natural gas. *National Gas Engine Association*, (4), 5-14. (In Russ.).
3. Vorobey, V.V. & Markin V.B. (2014). Fundamentals of design and technology of ultra-light composite high-pressure cylinders: monograph. Barnaul : AltGTU Publishing House. (In Russ.).
4. Vorobey, V.V. & Markin V.B. (2003). Fundamentals of technology and design of rocket engine casings. Novosibirsk: Nauka. (In Russ.).
5. Markin, V.B. & Sagynganova, I.K. (2019). Organization of conveyor execution of tasks in distributed automated control systems of heating points. *Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*, (1), 63-67. (In Russ.).
6. Blaznov, A.N., Markin, V.B. and other. (2018). Prospects for the creation of composite cylinders. *Technologies and equipment for chemical, biotechnological and food industries : Materials of the XI All-Russian scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists with international participation*. Barnaul: ASTU. (In Russ.).
7. Markin, V.B., Ananyeva, E.S. & Novikovskiy, E.A. (2015). Composite materials in modern mechanical engineering. *Central-Asian Material Science Journal*, (1), 45-50. (In Russ.).

Information about the authors

V. B. Markin - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Educational, Scientific and Production Center "Composite", Polzunov Altai State Technical University.

N. A. Myagkova - Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Economics and Production Management, Polzunov Altai State Technical University.