

УДК 629.023:677.4

О ВЫБОРЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ ЛЕЙНЕРА МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНОГО БАЛЛОНА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Трутнев Н.С.¹, Шишкин А.А.², Филимонова Т.В.²¹ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Россия²АО «НПП «ЗВЕЗДА» имени академика Г.И. Северина», Московская обл.,
п. Томилино, Россия

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены конструктивные особенности облегченных металлокомпозитных баллонов. Сформулированы основные требования к сосудам давления, основные из которых запас прочности и стойкость к циклическому изменению давления. На основе анализа требований установлено, что основным фактором, препятствующим достижению массового совершенства, является металлическая герметизирующая оболочка – лайнер. Так как основную нагрузку воспринимает композит, для снижения массы необходимо свести к минимуму толщину стенки лайнера, которая ограничена технологическими возможностями. Кроме того, наличие металла требует увеличения толщины композиционного слоя для исключения усталостного растрескивания.

При расчете конструкции баллона приняты основные граничные критерии: прочность и допустимый уровень деформаций, препятствующий попаданию металла в пластическое состояние. В результате анализа технологического цикла изготовления и испытаний металлокомпозитного сосуда давления установлено, что в конструкции возникают дополнительные технологические напряжения, которые влияют на конечный размах деформаций. На основе известных подходов к расчету комбинированных баллонов предложена методика расчета, учитывающая влияние технологических напряжений.

Выполнен уточненный расчет баллона из условий прочности и отсутствия пластических деформаций в металле для различных сочетаний материалов при различной толщине стенки лайнера. Установлено, что в большинстве случаев ограничивающим фактором является требование по ограничению деформаций металла. Учет технологических напряжений оказывает существенное влияние на расчетную массу баллона, т.к. в некоторых случаях толщина лайнера оказывает положительное влияние на деформации комбинированной конструкции. Получены соотношения металла и композита, обеспечивающие минимальную массу баллона. Установлено, что зависимость между массой сосуда и толщиной лайнера имеет нелинейный характер, и в некоторых сочетаниях материалов стремление к минимизации толщины металла нецелесообразно.

Ключевые слова: баллон высокого давления; композиционный материал; металлокомпозитный баллон

ABOUT SELECTION OF THE RATIONAL WALL THICKNESS OF A LINER HIGH PRESSURE METAL COMPOUND CYLINDER

Trutnev N.S.¹, Shishkin A.A.², Filimonova T.V.²¹Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia²RD&PE “Zvezda” Joint-Stock Company named after Academician G.I. Severin,
Tomilino, Moscow region, Russia

ABSTRACT

The design features of lightweight metal-composite cylinders are considered, the main requirements for pressure vessels are formulated. The principal part of them are include strength and resistance to cyclic pressure change. On the basis of the analysis of requirements, it has been established that the main factor preventing the achievement of mass perfection is the metal sealing shell - liner. Since the main load is perceived by the composite material, to weight savings, it is necessary to minimize the thickness of the wall of the liner, that is limited by technological possibilities. In addition, the presence of metal requires an increase in the amount of the composite layer to eliminate the fatigue failure of the liner.

When calculating the design of the cylinder, the basic boundary criteria are taken: the strength and the admissible strains, which prevents the metal from falling into the plastic state. As a result of the analysis of the technological cycle of fabrication and testing of the metal-composite pressure vessel, the additional technologies stresses that affect the final range of strains are established to arise in the structure. Based on the known approaches to the calculation of combined cylinders, a calculation technique which takes into account the influence of technological stresses is proposed.

The refined calculation made from the cylinder from the strength conditions and the absence of plastic strains in the metal for different combinations of materials at different wall thicknesses of the liner. It is established that in most cases the limiting factor is the requirement to limit metal strains. The account of technological stresses has a significant effect on the estimated mass of the cylinder, because in some cases, the thickness of the liner has a positive effect on the strains of the combined pressure vessel. The ration of metal and composite which ensure the minimum mass of the balloon are obtained. It is established that the correlation between the mass of the vessel and the thickness of the liner has a nonlinear character and in certain combinations of materials the tendency to minimize the metal is inexpedient.

Keywords: high-pressure cylinder; composite material; metal-composite cylinder

1. КОНСТРУКЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНЫХ БАЛЛОНОВ

Баллоны высокого давления широко применяются в авиа- и ракетостроении в качестве аварийных источников энергии, в дыхательных системах и системах пожаротушения. Облегченные металлокомпозитные баллоны приобрели большую популярность благодаря удачному сочетанию характеристик, таких как малый вес, технологичность изготовления и безопасность эксплуатации. Конструктивно такие баллоны (рис.1) представляют собой тонкостенную металлическую оболочку (лейнер), на которую методом намотки нанесен волокнистый композиционный материал (КМ).

Применение в конструкции баллонов КМ на основе углеродных и арамидных волокон позволяет добиться высокой массовой эффективности за счет сочетания высокой прочности и низкой плотности композитов, при этом наличие металлической оболочки обусловлено требованиями к надежности, срокам службы и герметичности баллонов. В связи с относительно высокой плотностью металлов наличие лейнера является в некоторой степени ограничением в достижении массового совершенства.

В настоящее время намечена тенденция на максимально возможное снижение толщины лейнера, что влечет за собой дополнительные технологические трудности: применительно к изготовлению цельноштампованных алюминиевых лейнеров – это гофрообразование при обжиме полой заготовки, сложность одновременного обеспечения достаточного

количества металла на горловине и минимальной толщины оболочки, ограничение по выпускаемому сортаменту при использовании трубных заготовок; применительно к намотке – это возможная потеря устойчивости лайнера под действием технологического натяжения [1].

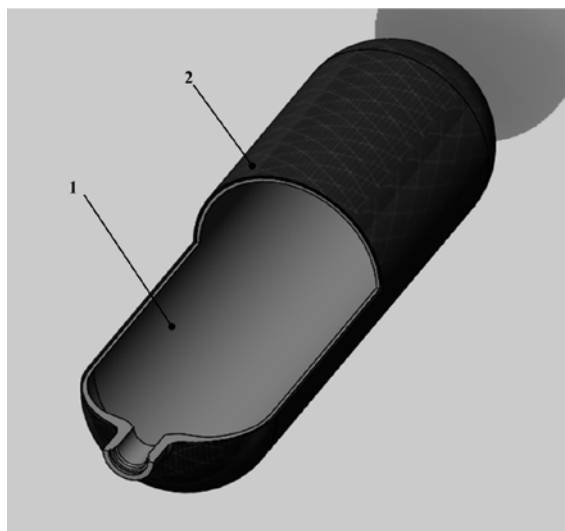


Рис.1. Конструкция металлокомпозитного баллона: 1 – металлическая герметичная оболочка (лейнер), 2 – композитная силовая оболочка.

В нормативно-технической документации сформулированы основные требования к баллонам давления для летательных аппаратов [2-4]:

- безосколочный характер разрушения при простреле;
- запас прочности не менее 2,4;
- каждый баллон должен пройти испытания (опрессовку) при 1,25-1,5 рабочего давления.

Одной из наиболее важных характеристик баллонов является стойкость к циклическому изменению давления, которая требуется для обеспечения длительного срока эксплуатации при изменении температуры и возможности многократной перезарядки. В металлических баллонах высокая циклическая стойкость обеспечивается «автоматически» при обеспечении определенного запаса прочности, т.к. в такой конструкции при рабочем давлении напряжения не достигают предела текучести металла.

В комбинированных баллонах лайнер находится в условиях знакопеременных нагрузок, вызванных растяжением под действием среды при зарядке (повышении давления) и сжатием под действием силовой композитной оболочки при разрядке (понижении давления). Таким образом, наличие металла в конструкции привносит ограничения, связанные с усталостной прочностью лайнера. Разность механических характеристик композитов и металлов приводит к тому, что в большинстве случаев в баллоне, спроектированном на заданный запас прочности, при рабочем давлении в лайнере возникают пластические деформации, что приводит к малоцикловой усталости и резкому снижению циклической стойкости всего изделия. В итоге, на массовую эффективность баллона влияет как масса лайнера, так и избыточная масса КМ, требуемая для ограничения деформаций, обеспечивающих достаточную циклическую стойкость металла.

Исходя из вышесказанного, можно заключить, что вследствие высокой трудоемкости изготовления баллона с максимально легким лейнером в условиях мелкосерийного производства, учитывая высокую цену высокопрочных волокон, полученный баллон будет иметь неоправданно высокую стоимость. Данный факт говорит о необходимости проведения исследований по поиску оптимального соотношения толщины металла и композита с учетом технологичности изготовления комбинированного баллона давления при минимальной массе.

2. РАСЧЕТ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНОГО БАЛЛОНА НА ПРОЧНОСТЬ

Известны работы [5-7], посвященные расчету и оптимальному проектированию металлокомпозитных баллонов. В связи с выраженной анизотропией волокнистых КМ силовую оболочку, как правило, изготавливают в виде комбинации кольцевых (окружных) и спиральных (меридиональных) слоев.

Угол укладки композита на спиральном слое будет зависеть от максимального радиуса баллона и радиуса полюсного отверстия (горловины). Для того, чтобы при намотке композит в полной мере реализовывал свои упругие и прочностные характеристики, образующие днищ баллона проектируются в виде «квазиэллипсоидных» поверхностей, обеспечивающих равнопрочность оболочки при намотке по геодезической траектории одного семейства нитей [8].

В работе [9] рассматривается расчет слоев металлокомпозитного баллона на основе нитяной модели, получены следующие зависимости для расчета толщин слоев из условия прочности

$$h_{\varphi} = \left(\frac{P \cdot R}{2} \cdot k - \sigma_T \cdot s \right) \cdot \frac{1}{\overline{\sigma}_k \cdot \cos^2 \varphi}, \quad (1)$$

$$h_{90} = \frac{k \cdot R \cdot P - \sigma_T \cdot s - \overline{\sigma}_k \cdot h_{\varphi} \cdot \sin^2 \varphi}{\overline{\sigma}_k}, \quad (2)$$

где P – рабочее давление, R – максимальный радиус баллона, k – коэффициент запаса прочности, h_{φ} – толщина спирального слоя КМ, h_{90} – толщина кольцевого слоя КМ, s – толщина стенки лейнера, φ – угол укладки на цилиндрическом участке, σ_T – предел текучести материала лейнера; $\overline{\sigma}_k$ – предел прочности КМ.

Помимо запаса прочности в баллоне требуется обеспечить циклическую стойкость. Известные методики проектирования металлокомпозитных баллонов [7] базируются на принципе совместности деформаций металла и композита, в основном они сводятся к расчету на запас прочности с последующим поверочным расчетом для определения напряжений при рабочем и испытательном давлениях. Далее по результатам испытаний подбираются деформации, обеспечивающей требуемый ресурс по циклам.

Данный подход требует большого количества трудоемких опытных работ и имеет определенные неточности, связанные с тем, что в расчете не учитываются дополнительные напряжения, возникающие в комбинированном баллоне в процессе изготовления. Рассмотрим влияние технологических факторов более подробно.

3. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАЛЛОНОВ

Технология изготовления армирующего композитного слоя подразумевает создание определенного натяжения в ленте [10] для одновременного включения в работу большего количества нитей, так, например, применение арамидных волокон при намотке подразумевает значительное технологическое натяжение (до 30% разрывной нагрузки), которое очевидно повлияет на напряженно-деформированное состояние баллона, при этом величина натяжения ограничивается потерей устойчивости лейнера.

В современной практике изготовления металлокомпозитных баллонов применяется операция автофретирования (автофреттажа), суть которой заключается в создании в композитной оболочке растягивающих напряжений, а в лейнере – сжимающих, путем подачи избыточного давления. Данная операция позволяет стабилизировать состояние баллона при нулевом давлении и повысить циклическую стойкость металла за счет его упрочнения.

Известно, что основным фактором, влияющим на циклическую стойкость металлов, является амплитуда деформаций, чем шире ее размах, тем скорее наступает усталостное разрушение. Очевидно, что дополнительные напряжения в баллоне могут оказать существенное влияние на совместную деформацию металла и композита, графически это изображено на рис.2. При этом высокая жесткость лейнера позволит создать большие напряжения в КМ и уменьшить общие деформации при рабочем давлении.

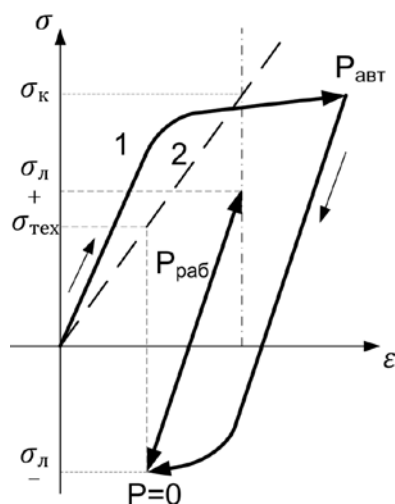


Рис.2. Совместность деформации алюминиевого лейнера и КМ при автофретировании: 1 – диаграмма растяжения алюминиевого сплава; 2 – диаграмма растяжения КМ.

Учет напряжений, возникающих в процессе изготовления комбинированных баллонов (назовем их технологическими), позволит более точно определять минимально необходимое количество намотки, требуемое для исключения пластических деформаций металлического лейнера при рабочем давлении.

Рассмотрим напряжения, возникающие в кольцевом слое в процессе изготовления комбинированного баллона (рис.3). При намотке до полимеризации связующего под действием технологического натяжения ленты в волокнах возникают растягивающие напряжения, а в стенках лейнера – сжимающие

(рис.3а). Далее после полимеризации под действием давления автофреттирования ($P_{пр}$) в баллоне возникают растягивающие напряжения, выводящие металл за пределы упругих деформаций (рис.3б), при этом основную нагрузку воспринимает КМ. После сброса давления композит, стремясь к исходному состоянию, деформирует лейнер до наступления равновесия между сжимающими силами в металле и растягивающими в композите (рис.3в).

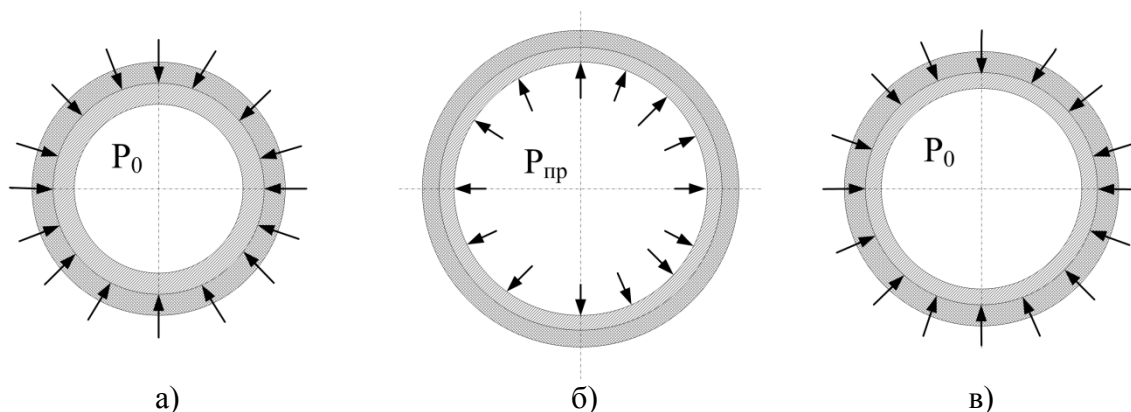


Рис.3. Распределение напряжений на этапах изготовления баллона: а) – намотка КМ; б) – автофреттирование; в) – равновесное состояние.

Таким образом, при нулевом давлении в лейнере возникают сжимающие напряжения, близкие к пределу текучести, а при рабочем – растягивающие. Пренебрегая деформациями баллона, а рассматривая только равновесное напряженное состояние между металлом и композитом можно определить технологические напряжения в оболочке. Стоит отметить, что под действием автофреттирования лейнер подвергается знакопеременной нагрузке, и в соответствии с эффектом Баушингера напряжение текучести металла после снятия нагрузки снизится, данный факт можно приближенно учесть коэффициентом 0,9.

Из уравнения равновесия сил найдем напряжения в лейнере, создаваемые композитной оболочкой, при этом в связи с тем, что рассматриваемые элементы являются тонкостенными, не учитываем разницу между средними радиусами оболочек.

Определим окружные напряжения на цилиндрической части баллона

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_{10} (h_{90} + h_{\varphi} \cdot \sin^2 \varphi)}{s};$$

меридиональные напряжения составят

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{10} \cdot h_{\varphi} \cdot \cos^2 \varphi}{s},$$

где σ_{θ} , σ_m – соответственно окружные и меридиональные сжимающие напряжения в лейнере, создаваемые КМ; s – минимальная толщина стенки лейнера; σ_{10} – технологические напряжения в композите; φ – угол укладки спирального слоя КМ.

Условие пластичности плосконапряженного состояния, выраженное в главных напряжениях, имеет вид

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_m^2 - \sigma_{\theta} \cdot \sigma_m + \sigma_{\theta}^2}.$$

Учитывая, что окружные напряжения в цилиндрическом баллоне всегда превышают меридиональные, определим условия, при которых возникнет равновесие между металлом и композитом

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta} &= 0,9 \cdot \sigma_T \\ \sigma_m &\leq 0,9 \cdot \sigma_T \\ \sigma_s &\leq 0,9 \cdot \sigma_T\end{aligned}\quad (3)$$

Проведенный анализ напряженного состояния баллона позволяет определить технологические напряжения в баллоне, что позволит более корректно рассчитать необходимое количество КМ, позволяющее исключить пластические деформации лайнера.

4. РАСЧЕТ БАЛЛОНА ПО ДЕФОРМАЦИЯМ МЕТАЛЛА И КОМПОЗИТА

Как уже говорилось, для обеспечения циклического ресурса баллона необходимо определить количество КМ, позволяющее ограничить деформации лайнера в упругой зоне при рабочем давлении. Для этого определим напряжения в композите при деформациях, соответствующих пределу текучести металла [9], и прибавим технологические напряжения

$$\sigma_{\kappa} = \frac{\sigma_T \cdot (1 - \mu) \cdot E_{\kappa}}{E_m} + \sigma_{10} \quad (4)$$

где E_{κ} , E_m – соответственно модули упругости композита и металла, σ_{10} – технологические напряжения в КМ представляющие сумму напряжений от натяжения на станке и процесса автофретирования соответственно.

С учетом выражения (4) зависимости для определения толщин КМ, необходимых для исключения пластических деформаций при рабочем давлении примут вид

$$h_{\varphi} = \left(\frac{P \cdot R}{2} \cdot k_o - \sigma_T \cdot s \right) \cdot \frac{E_m}{(\sigma_T \cdot (1 - \mu) \cdot E_{\kappa} + \sigma_{10} \cdot E_m) \cdot \cos^2 \varphi} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}h_{90} &= \left[k_o \cdot R \cdot P - \sigma_T \cdot s - \left(\frac{\sigma_T \cdot (1 - \mu) \cdot E_{\kappa}}{E_m} + \sigma_{10} \right) \cdot h_{\varphi} \cdot \sin^2 \varphi \right] \cdot \\ &\cdot \frac{E_m}{\sigma_T \cdot (1 - \mu) \cdot E_{\kappa} + \sigma_{10} \cdot E_m}\end{aligned}\quad (6)$$

Ввиду того, что при знакопеременной нагрузке допустимый размах деформаций должен быть увеличен почти в 2 раза, в формулах (5), (6) логично было бы добавить увеличивающий коэффициент для упругих напряжений. Однако при деформировании реальных металлов имеют место следующие аспекты:

1. Алюминиевые сплавы не имеют физического предела выносливости, т.е. склонны к усталостному разрушению даже при упругих деформациях, соответственно любое дополнительное ограничение деформации приведет к увеличению циклической стойкости.

2. В справочных материалах для алюминиевых сплавов как правило приводится условный предел текучести (при деформации 0,2%), однако истинный размах упругих деформаций характеризует предел пропорциональности, который как правило на 10-20% ниже, чем условный предел текучести.

3. Влияние эффекта Баушингера при переходе из растянутого состояния в сжатое приведет к снижению предела текучести.

Ввиду того, что все указанные факторы суммарно должны привести к снижению допустимого размаха деформации при отсутствии экспериментальных данных о степени их влияния в расчете принимается, что допустимый размах деформаций ограничен величиной условного предела текучести.

Для одновременного обеспечения требований по запасу прочности и циклической стойкости расчет баллона нужно выполнять в следующей последовательности:

- расчет на прочность по (1), (2);
- расчет по деформациям по (5), (6);
- выбор результатов расчета по наиболее жестким критериям.

Учитывая тот факт, что в зависимости от толщины и свойств металла лейнера в соответствии с расчетом будет меняться толщина КМ и наступление равновесия будет происходить при различных технологических напряжениях, расчет следует выполнять в несколько итераций, постепенно увеличивая технологические напряжения до выполнения условий (3).

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ ЛЕЙНЕРА

Из проведенного анализа видно, что механические характеристики лейнера будут оказывать влияние на напряженное состояние в баллоне при нулевом давлении, при этом, большая жесткость лейнера позволит создать большие напряжения в композите и реализовать его прочностные характеристики, снижая амплитуду деформаций при рабочем давлении.

На основе полученных зависимостей был выполнен расчет массы баллона объемом 2 литра, диаметром 0,1 м с рабочим давлением 21 МПа при различных толщинах стенки лейнера для различных материалов. Блок-схема последовательности расчета приведена на рис.4. Сначала задается толщина стенки лейнера и с помощью формул (1), (2), (5), (6) определяется необходимая толщина КМ, затем в несколько итераций определяются максимально возможные технологические натяжения до наступления равновесия (6), после каждой итерации пересчитываются толщины по (5), (6) и определяются более жесткие критерии расчета. После получения окончательных толщин слоев КМ определяется общая масса баллона. Далее расчет повторяется для другой толщины лейнера. При расчете массы принято, что независимо от соотношения металла и композита баллон имеет одинаковые днища эллипсоидной формы.

В таблицах 1,2 приведены принятые в расчете свойства материалов. Свойства композитов с разными волокнами определены по методике вычисления приведенных характеристик, рассмотренной в работе [7]. По результатам расчета построены графики зависимости массы изделия от толщины стенки лейнера (рис.5).

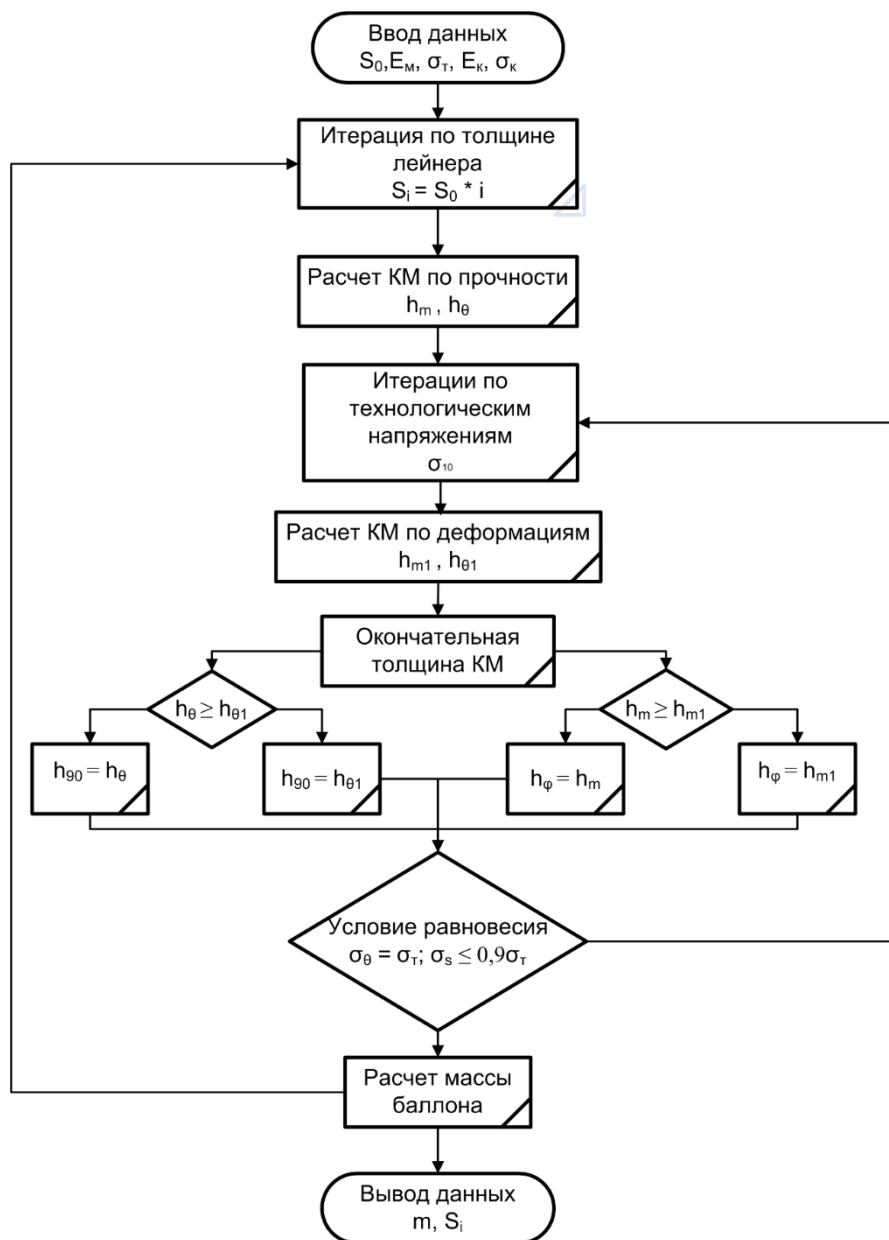


Рис.4. Блок-схема расчета рациональной толщины стенки.

Таблица 1.

Свойства волокнистых материалов.

Марка волокна	Модуль упругости, ГПа	Предел прочности, МПа	Плотность, г/м ³
УГЛЕВОЛОКНО			
УКН-II-5000	215	2800	1,73
Кулон ВМ	460	4070	1,73
УМТ45-12К	250	4500	1,78
ОРГАНОВОЛОКНО			
Армос 530	152	3924	1,45

Таблица 2.

Свойства алюминиевых сплавов.

Марка сплава	Модуль упругости, ГПа	Предел текучести, МПа	Плотность, г/м ³
АД31Т1	70	196	2,71
В95Т3	68	392	2,85

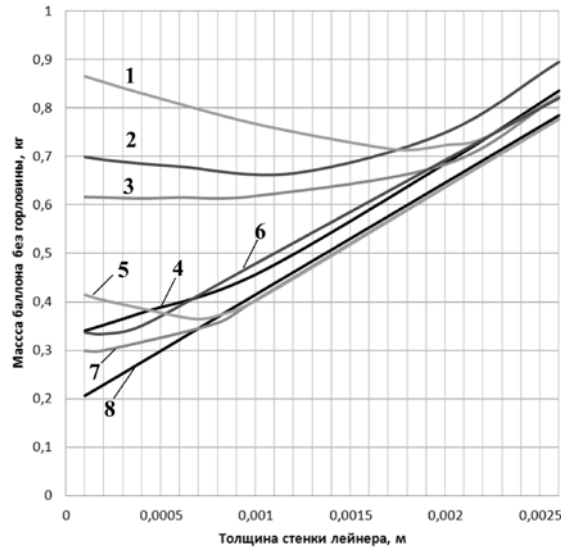


Рис.5. Зависимость массы баллона от толщины лейнера с учетом технологических напряжений для различных материалов: 1 – АД31Т1+Армос 530; 2 – АД31Т1+УКН-П-5000; 3 – АД31Т1+УМТ45-12К; 4 – АД31Т1+Кулон ВМ; 5 – В95Т3+Армос 530; 6 – В95Т3+УКН-П-5000; 7 – В95Т3+УМТ45-12К; 8 – В95Т3+Армос 530.

Полученные графики показывают, что для некоторых сочетаний материалов существует соотношение толщины стенки лейнера и КМ, обеспечивающие минимальную массу изделия. Наиболее четко выраженные точки минимума наблюдаются у композитов с относительно невысокими упругими характеристиками и высокой удельной прочностью. Необходимо отметить, что данные зависимости (рис.5) справедливы только для конкретного баллона по диаметру и рабочему давлению.

6. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные теоретические исследования показывают, что зависимость массы баллона от толщины стенки лейнера имеет нелинейный характер. Это объясняется разностью между предельными деформациями КМ и упругими деформациями металла. При высоком пределе текучести металла лейнера или значительной толщине стенки композит способен одновременно обеспечить требуемый запас прочности и ограничить деформации в упругой зоне, т.к. относительно высокая жесткость лейнера позволяет создать большие предварительные напряжения в композите, за счет чего снизить деформации баллона при рабочем давлении.

Применение максимально тонкого лейнера оправдано только при применении высокопрочных сплавов типа В95 или высокомодульных

волокон Кулон ВМ. С точки зрения экономической эффективности это не целесообразно из-за повышения технологической сложности изготовления лайнера и высокой стоимости высокомодульных волокон. При применении лайнера с толщиной стенки 0,0015-0,002 м разница в массе баллонов из различных материалов оказывается незначительной, при этом целесообразно применять менее дефицитный, более технологичный и более коррозионностойкий сплав АД31 в сочетании с высокопрочными волокнами. При этом изготовление цельноштампованного лайнера с толщиной стенки в районе 0,0002 м не вызовет технологических проблем при обжиге и позволит применять стандартные трубные заготовки, что экономически выгодно для мелкосерийного производства.

ВЫВОДЫ

Проведенные теоретические исследования позволяют сделать следующие выводы:

- свойства и толщина лайнера вносят активный вклад в общую деформативность и ресурсные характеристики металлокомпозитного баллона;
- в комбинированном баллоне, работающем при циклических нагрузках, снижение толщины стенки лайнера не всегда приводит к повышению массовой эффективности, что позволяет разрешить ряд конфликтов между процессом проектирования и технологичностью изготовления;
- разработанный в работе подход открывает возможности к пересмотру эффективности применения различных КМ, определенных по известным методикам;
- очевидно, что определение реальной циклической стойкости металла лайнера требует проведения опытных работ, однако разработанная методика расчета позволяет получить предварительную качественную оценку, сузить зону поиска и тем самым сократить количество экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шишкин А.А. *Исследование предельных возможностей обжима тонкостенных полых заготовок в производстве сосудов давления* // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2016. – №3(21). – С.62-72.
2. ОСТ 1 03749-74 Баллоны на $P_{\text{раб.}} = 21$ МПа (210 кгс/см²). Типы и основные параметры, технические требования. – 7 с.
3. ГОСТ 15586-93. Системы пневматические летательных аппаратов. Номинальные, рабочие и испытательные давления. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – Минск.
4. Федеральные нормы и правила в области промышленности безопасности «Правила промышленной безопасности опасных производственных объектов, на которых используются оборудование, работающее под избыточным давлением». Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 25 марта 2014 г. №116.
5. Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В. и др. *Композиционные материалы: Справочник*. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.

6. Буланов И.М., Смыслов В.И., Комков М.А., Кузнецов В.М. *Сосуды давления из композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов.* – М.: ЦНИИ информации, 1985. – 308 с.
7. Комков М.А., Тарасов В.А. *Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения: учеб. пособие.* – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 431 с.
8. Образцов И.Ф., Васильев В.В., Бунаков В.А. *Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов.* – М.: Машиностроение, 1977. – 144 с.
9. Трутнев Н.С., Шишкин А.А., Филимонова Т.В. *Обоснование выбора конструкции и материала облегченного металлокомпозитного баллона высокого давления для авиационной промышленности // Научные технологии.* – 2016. – Т.17. – №6. – С.57-64.
10. Воробей В.В., Маркин В.Б. *Основы технологии и проектирования корпусов ракетных двигателей.* – Новосибирск: Наука, 2003. – 164 с.

REFERENCES

1. Shishkin A.A. *Issledovanie predel'nykh vozmozhnostej obzhima tonkostennykh polykh zagotovok v proizvodstve sosudov davleniya [Researching of the extreme performance of the reduction of thin-walled tubular billets in production of pressure vessels].* *Novosti materialovedeniya, Nauka i tekhnika*, 2016, No.3(21), Pp.62-72.
2. OST 1 03749-74 *Ballony na $R_{rab.} = 21 \text{ MPa}$ (210 kgs/sm^2). Typy i osnovnye parametry, tekhnicheskie trebovaniya [Types and main parameters, technical requirements]*, 7 p.
3. GOST 15586-93. *Sistemy pnevmaticheskie letatel'nykh apparatov. Nominal'nye, rabochie i ispytatel'nye davleniya. [Pneumatic systems of aircraft. Nominal, working and test pressures]* *Mezhhgosudarstvennyj sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii*, Minsk.
4. *Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennosti bezopasnosti "Pravila promyshlennosti bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob'ektov, na kotorykh ispol'zuyutsya oborudovanie, rabotayushhee pod izbytochnym davleniem"* [Federal rules and regulations in the field of industrial security "Security industry regulations at dangerous production objects, where the equipment is used, which operates under high pressures"]. *Utverzhdeny prikazom Federal'noj sluzhby po ehkologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 25 marta 2014 goda*, No.116.
5. Vasil'ev V.V., Protasov V.D., Bolotin V.V. et al. *Kompozitsionnye materialy: Spravochnik [The reference on composite materials].* Moskva, Mashinostroenie, 1990, 512 p.
6. Bulanov I.M., Smyslov V.I., Komkov M.A., Kuznecov V.M. *Sosudy davleniya iz kompozitsionnykh materialov v konstruktsiyakh letatel'nykh apparatov [Pressure vessels from composite materials in aircraft design].* Moskva, TSNIi informatsii, 1985, 308 p.
7. Komkov M.A., Tarasov V.A. *Tekhnologiya namotki kompozitnykh konstruksij raket i sredstv porazheniya: ucheb. posobie [The reference on rocket and means of destruction composite constructions winding technology].* Moskva, Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2011, 431 p.

8. Obratsov I.F., Vasil'ev V.V., Bunakov V.A. *Optimal'noe armirovanie obolochek vrashheniya iz kompozitsionnykh materialov [Spinning shells optimal reinforcement from composite materials]*. Moskva, Mashinostroenie, 1977, 144 p.
9. Trutnev N.S., Shishkin A.A., Filimonova T.V. *Obosnovanie vybora konstruksii i materiala oblegchennogo metallokompozitnogo ballona vysokogo davleniya dlya aviatsionnoj promyshlennosti [Rationale for design and material selection of metal-lite high pressure cylinders for the aircraft industry]*. Naukoemkie tekhnologii, 2016, Vol.17, No.6, Pp.57-64.
10. Vorobej V.V., Markin V.B. *Osnovy tekhnologii i proektirovaniya korpusov raketnykh dvigatelej [Rocket engines body technology and design basics]*. Novosibirsk, Nauka, 2003, 164 p.

Поступила в редакцию 31 июля 2018 года.

Сведения об авторах:

Трутнев Николай Степанович – к.т.н., доц., Кафедра «Аппаратурное оформление и автоматизация технологических производств», ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Россия; e-mail: trutnev7@yandex.ru

Шишкин Алексей Анатольевич – к.т.н., нач. Конструкторского отдела, АО «НПП «ЗВЕЗДА» им. акад. Г.И. Северина», Московская обл., п. Томилино, Россия; e-mail: hewa@inbox.ru

Филимонова Татьяна Валерьевна – асп., инж.-конструктор, АО «НПП «ЗВЕЗДА» им. акад. Г.И. Северина», Московская обл., п. Томилино, Россия; e-mail: filimon2510@mail.ru