

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА НА УСТОЙЧИВОСТЬ СВАРНОГО ЛЕЙНЕРА В МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНОМ БАЛЛОНЕ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

А.Б. Жумагалиева¹⁾, Ж.Б. Абдурашитов²⁾, Д.С. Ергалиев³⁾

1) Магистрант кафедры «Космическая техника и технологии» Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан, ai.zhum97@mail.ru

2) Магистрант кафедры «Космическая техника и технологии» Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан, san.2705@mail.ru

3) Профессор кафедры «Космическая техника и технологии» Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан, des-67@ya.ru

Аннотация: Среди известных конструкций баллонов высокого давления (БВД) — в космической технике (КТ), для хранения инертных газов — нашли применение металлокомпозитные баллоны высокого давления (МК БВД) как баллоны, обладающие на сегодня наибольшим коэффициентом весовой эффективности — важнейшим показателем для ракетно-космической техники.

Успешная эксплуатация данных баллонов возможна при правильном их проектировании, конструировании и изготовлении. Накопленный опыт показал, что к рациональным конструкциям металлокомпозитные баллоны высокого давления можно отнести баллоны с алюминиевым сварным лейнером и намотанной на него углепластиковой оболочкой. Такие баллоны способны выдерживать высокие статические и малоцикловые нагрузки внутренним давлением, если они оптимально спроектированы и качественно изготовлены. По расчету и технологии изготовления металлокомпозитные баллоны высокого давления существует много теоретических и экспериментальных исследований, включая практические рекомендации по производству.

Целью данной работы является повышение надёжности металлокомпозитных баллонов высокого давления для космической техники за счёт определения условий устойчивости лейнера при наличии производственных конструктивно-технологических отклонений.

Ключевые слова: баллоны высокого давления, металлокомпозитные баллоны высокого давления, композитной оболочки, конечные элементы.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR CALCULATING THE STABILITY OF A WELDED LINER IN A METAL COMPOSITE PRESSURE CYLINDER FOR SPACE TECHNOLOGY

A.B. Zhumagaliyeva, Zh.B. Abdurashitov, D.S.Yergaliyev

1) Master's degree student of the Department of Space Engineering and Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan, ai.zhum97@mail.ru

2) Master's degree student of the Department of Space Engineering and Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan, san.2705@mail.ru

3) Professor of the Department of Space Engineering and Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan, des-67@ya.ru

Abstract: among the well — known designs of high — pressure cylinders (BVD) — in space technology (CT), for the storage of inert gases-metal composite high-pressure cylinders (МК BVD) have been used as cylinders that currently have the highest coefficient of weight efficiency-the most important indicator for rocket and space technology.

Successful operation of these cylinders is possible if they are properly designed, constructed and manufactured. The accumulated experience has shown that the rational designs of high-pressure metal composite cylinders include cylinders with an aluminum welded liner and a carbon fiber shell wound on it. These cylinders are able to withstand high static and low-cycle internal pressure loads if they are optimally designed and manufactured with high quality. There are many theoretical and experimental studies on the calculation and manufacturing technology of high-pressure metal composite cylinders, including practical recommendations for production.

The purpose of this work is to increase the reliability of high-pressure metal composite cylinders for space technology by determining the conditions of stability of the liner in the presence of production design and technological deviations.

Keywords: high-pressure cylinders, metal-composite high-pressure cylinders, composite shell, final elements.

Введение. Выбор и обоснование расчётной схемы металлокомпозитного баллона высокого давления.

Выбор расчетной модели потери устойчивости лайнера в составе цилиндрического МК БВД (рис. 1) предполагает выделение конструкции представительного элемента (ПЭ), охватывающего проблемную центральную зону баллона, схематизацию свойств применяемых материалов и предварительную оценку механики процесса. Эти задачи решаются путем проведения численных расчетов по специально разработанным компьютерным программам.

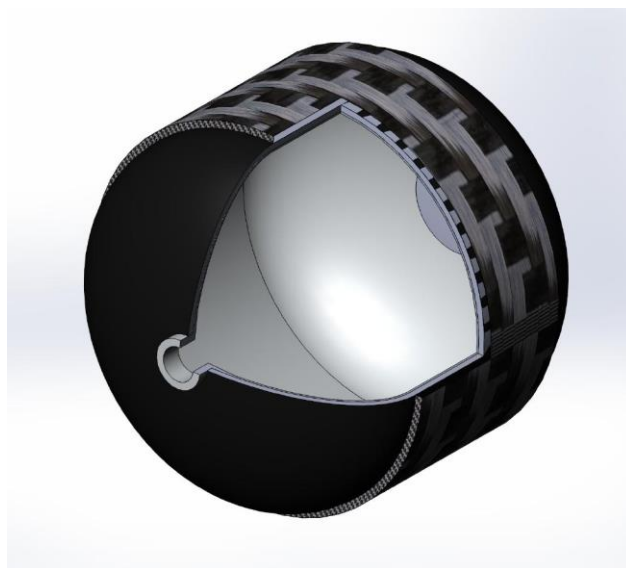


Рис. 1 - 3D-модель цилиндрического МК БВД

Анализ влияния дниц на деформирование цилиндрической части баллона осуществлялся конечно-элементным расчетом в программных комплексах Patran/Nastran (Femap/Nastran). Геометрия МК БВД задавалась согласно параметрам реального баллона. Формирование конечно-элементной модели МК БВД проводили при следующих допущениях [1]:

- 1) лайнер и КМО — тонкостенные оболочки;
- 2) лайнер — изотропный упругопластический;
- 3) КМО — ортотропная линейноупругая;
- 4) конструкция и нагружение внутренним давлением — осесимметричные;
- 5) контакт лайнера и КМО — с двухсторонней связью типа «клей», что исключает подвижность лайнера относительно КМО.

Модель разбивается (рис. 2) на плоские четырехузловые конечные элементы типа CQUADX4 (2D-Solid, осесимметричный элемент). Расчеты проводились при внутреннем давлении $p = 55$ МПа. Тип анализа в NX.NASTRAN выбирался Nonlinear static.

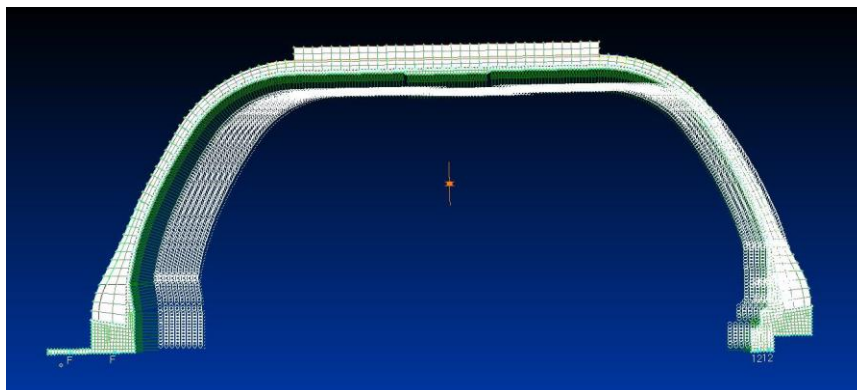


Рис. 2 - Конечно-элементная модель осесимметричного МК БВД

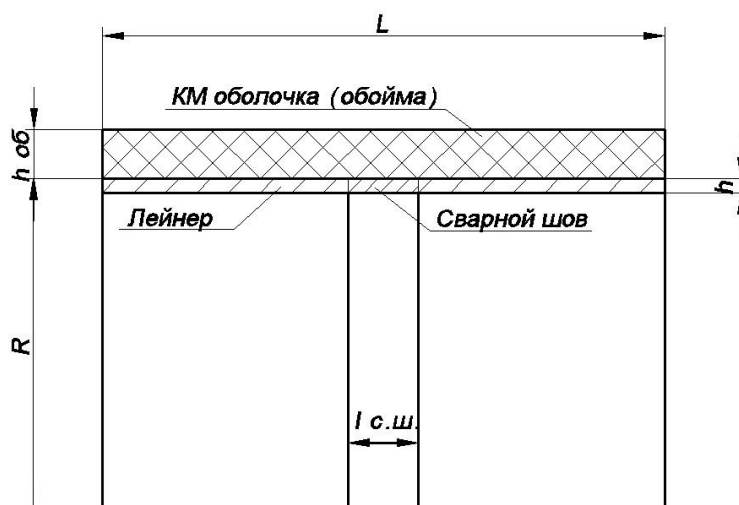


Рис. 3 - Представительный элемент цилиндрической части МК БВД

Поэтому конструкция ПЭ для анализа устойчивости лейнера может быть представлена двухслойной цилиндрической оболочкой со сварным швом в средней части лейнера (рис. 3), с выполнением условий тонкостенности:

$$\frac{D}{h} = 100/300$$

и условия протяженности оболочки

$$\frac{D}{L} < 10$$

Схематизацию свойств материала лейнера выбирали исходя из расчетов напряжено-деформированного состояния по разработанным компьютерным программам БВД-1 [1] и БВД-2 [2] в среде MATLAB.

В программе БВД-1 лейнер считался идеальным упругопластическим (рис. 4), в БВД-2 — упругопластическим с упрочнением (рис. 5).

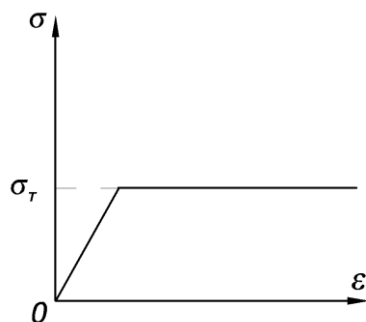


Рис. 4 - Диаграмма деформирования идеального упругопластического лайнера

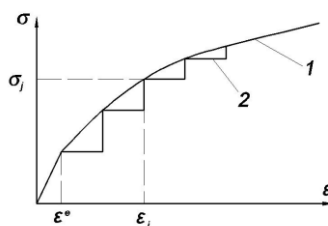


Рис. 5 - Диаграмма деформирования упругопластического лайнера

Общими для программ БВД-1 и БВД-2 являются допущения:

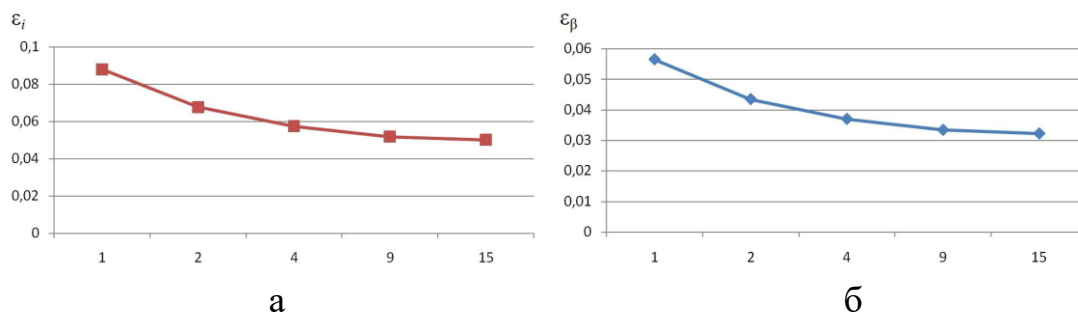
- 1) КМО — линейноупругая, квазиоднородная, ортотропная;
- 2) оболочки — безмоментные;
- 3) контакт лайнера и КМО — с двухсторонней идеальной связью.

В отличие от БВД-1, в программе БВД-2 учет упругопластических свойств лайнера проводился с применением метода последовательных нагружений и схемы «шаговых площадок текучести» [3].

В программе БВД-1 определялось напряженно-деформированное состояние лайнера при нагрузке баллона внутренним давлением p от 30 МПа до 80 МПа. Меридиональные ϵ_α^0 и кольцевые ϵ_β^0 остаточные деформации после разгрузки лежали в интервале $\epsilon_\alpha^0 = 0.38 \dots 1.15\%$, $\epsilon_\beta^0 = 0.43 \dots 1.2\%$. Эти данные относятся к МК БВД с алюминиевым лайнером и углепластиковой оболочкой.

По программе БВД-2 было проведено уточнение результатов расчета МК БВД, полученных по БВД-1 при нагружении баллона внутренним давлением $p = 78$ МПа. Разница по деформациям по Мизесу ϵ_i и окружным

деформациям составила 40 % (рис. 6), что свидетельствует о важности учета зоны упрочнения на диаграмме деформирования лейнера.



Таким образом, рассмотренные идеально упругопластическая и упругопластическая с упрочнением модели деформирования лейнера показали, что при решении задач устойчивости лейнера в составе МК БВД необходимо применять реальные диаграммы деформирования лейнера.

По механическим свойствам КМО и лейнер различаются принципиально:

КМО — линейноупругая, квазиоднородная, ортотропная;

лейнер — упругопластический с упрочнением, изотропный, конструктивно неоднородный за счет наличия сварного шва. Нагрузки подразделяются на силовые и температурные. К силовым нагрузкам относится подача и сброс внутреннего давления (p); при этом может учитываться эффект днищ через осевую силу F , приложенную к КМО (см. рис. 6) или не учитываться, — тогда $F = 0$.

Температурные нагрузки применяются в качестве аналогов давления опрессовки лейнера. Опрессовка лейнера — задание радиальных перемещений, направленных к оси цилиндрического лейнера — осуществляется двумя способами: охлаждением обоймы (КМО) или нагревом лейнера. В обоих случаях принимается, что тепловой контакт лейнера и обоймы отсутствует.

Технологические отклонения в лейнере и КМО схематично представляются в виде вырезов и выступов в лейнере и КМО (рис. 7) различной глубины и протяженности. Вдоль оси лейнера они считаются постоянными. Отдельно могут рассматриваться дефекты в сварном шве.

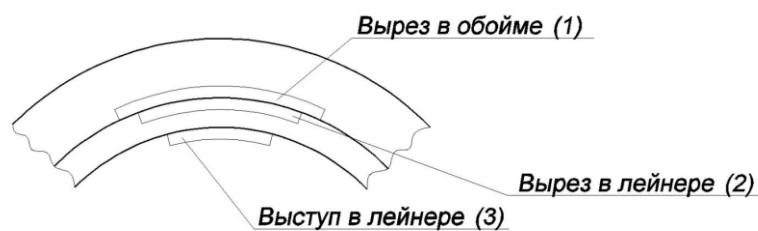


Рис. 7 - Технологические отклонения, включенные в расчетную модель

Для фиксации моментов начала потери устойчивости лайнера, развития в нем локальных деформаций и формирования ярко выраженных «лепестков» (внутренних выпучин заметной амплитуды) процесс механического поведения лайнера должен рассматриваться в режиме текущего времени.

Анализ построенной расчетной модели показывает, что реализовать ее можно с помощью объемных конечных элементов в программном комплексе LS-DYNA в динамической постановке.

Вывод. В заключение данной работы были проделаны следующие работы:

1. Выбрана и обоснована, проведенными предварительными исследованиями по специально разработанным компьютерным программам, расчетная модель деформирования лайнера в составе цилиндрического МК БВД, отражающая геометрические, механические, производственные и эксплуатационные особенности баллонов для космической техники.

2. Примененные для описания лайнера и композитной оболочки объемные конечные элементы в программном комплексе LS-DYNA, с решением в динамической постановке, дали возможность выполнить трехмерный анализ напряженно-деформированного состояния лайнера, рассмотреть процесс деформирования лайнера в режиме текущего времени, достаточно полно учесть технологические отклонения и конструктивную неоднородность сварного лайнера.

Список использованных источников:

1. Анализ конструктивных вариантов металлокомпозитных баллонов высокого давления / В.П. Молочев, В.Н. Егоров, А.В. Севальнев, Е.А. Абрамова // Авиационная промышленность. 2012. № 1. С. 42–45.

2. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: учеб. Для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 516 с.

3. Егоров А.В., Азаров А.В. Численно-аналитический метод расчёта металлокомпозитного баллона высокого давления // Электронный журнал «Труды МАИ». 2014. № 73.