

ДЕФОРМИРОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЛЕЙНЕРА В ЖЕСТКОЙ ОБОЙМЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОБЪЕМНЫХ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ LS-DYNA

Д.М. Калманова¹⁾, О.К. Абдирашев²⁾, Г.А. Ануар³⁾, Н.Г. Ырыскелди⁴⁾, А.Б. Жумагалиева⁵⁾

1) к.п.н., ст. преподаватель Евразийского Национального университета, г. Нур-Султан, Казахстан, dinara_kalmanova@mail.ru

2) магистр, ст. преподаватель Евразийского Национального университета, г. Нур-Султан, Казахстан, omeke_92@mail.ru

3) магистр, преподаватель Евразийского Национального университета, г. Нур-Султан, Казахстан, galym_rma@mail.ru

4) магистр, преподаватель Евразийского Национального университета, г. Нур-Султан, Казахстан, n.yryskeldi@mail.ru

5) магистр Евразийского Национального университета, г. Нур-Султан, Казахстан, ai.zhum97@mail.ru

Аннотация. В настоящее время отсутствуют методики, которые позволяют оцепить объемное напряженно-деформированное состояние металлического сварного лейнера в составе МК БВД (металлокомпозитного баллона высокого давления) в процессе производства, испытаний и эксплуатации и рассмотреть задачу деформирования лейнера с учетом конструктивно-технологических отклонений, в режиме текущего времени. Объектом исследования является цилиндрический МК БВД с алюминиевым сварным лейнером и многослойной (композитной) оболочкой для КТ (космической техники).

Методика расчета на устойчивость лейнера в составе МК БВД объединяет расчетную модель и конечно-элементное моделирование в программном комплексе LS-DYNA.

Цель данной работы заключается в применении объемной конечно-элементной модели лейнера и КМО (композитной оболочки) в программном комплексе LS-DYNA (динамическая постановка), позволяющей определять трехмерное напряженно – деформированное состояние, рассматривать процесс деформирования лейнера в режиме текущего времени, учитывать технологические отклонения, возникающие при изготовлении лейнера и КМО.

Ключевые слова: баллон высокого давления, композитные оболочки, опрессовка лейнера, металлокомпозитные баллоны высокого давления, представительный элемент.

DEFORMATION OF A CYLINDRICAL LINER IN A RIGID ENCLOSURE WITH THE USE OF VOLUMETRIC FINITE ELEMENTS IN THE LS-DYNA SOFTWARE PACKAGE

Dinara M. Kalmanova¹⁾, Omirzak K. Abdirashev²⁾, Galymzhan A. Anuar³⁾, Nazerke G. Yryskeldi⁴⁾, Aigerim B. Zhumagaliyeva⁵⁾

1) Candidate of Pedagogical Sciences, senior lecturer of Eurasian National University, city of Nursultan, Kazakhstan, dinara_kalmanova@mail.ru

2) master, senior lecturer of Eurasian National University, city of Nursultan, Kazakhstan, omeke_92@mail.ru

3) master, teacher of Eurasian National University, city of Nursultan, Kazakhstan, galym_rma@mail.ru

4) master, teacher of Eurasian National University, city of Nursultan, Kazakhstan, n.yryskeldi@mail.ru

5) master of Eurasian National University, city of Nursultan, Kazakhstan, ai.zhum97@mail.ru

Abstract: Currently, there are no methods that allow to encircle the volumetric stress-strain state of a metal welded liner as part of a metal composite high-pressure cylinder during production, testing and operation and to consider the problem of deformation of the liner, taking into account structural and technological deviations, in the current time mode. The object of the study is a cylindrical metal-composite high-pressure cylinder with an aluminum welded liner and a multilayer (composite) shell for space technology.

The method of calculating the stability of the liner as part of a metal composite high-pressure cylinder combines a computational model and finite element modeling in the LS-DYNA software package.

The purpose of this work is to apply a volumetric finite element model of the liner and composite shell in the LS-DYNA software package (dynamic formulation), which allows to determine the three-dimensional stress-strain state, to consider the deformation of the liner in the current time mode, to take into account technological deviations that occur during the manufacture of the liner and composite shell.

Key words: high-pressure cylinder, composite shells, liner crimping, metal-composite high-pressure cylinders, representative element.

Методика расчета на устойчивость лейнера в составе МК БВД (металлокомпозитного баллона высокого давления) объединяет расчетную модель и конечно-элементное моделирование в программном комплексе LS-DYNA. Структура методики представлена на рис. 1.

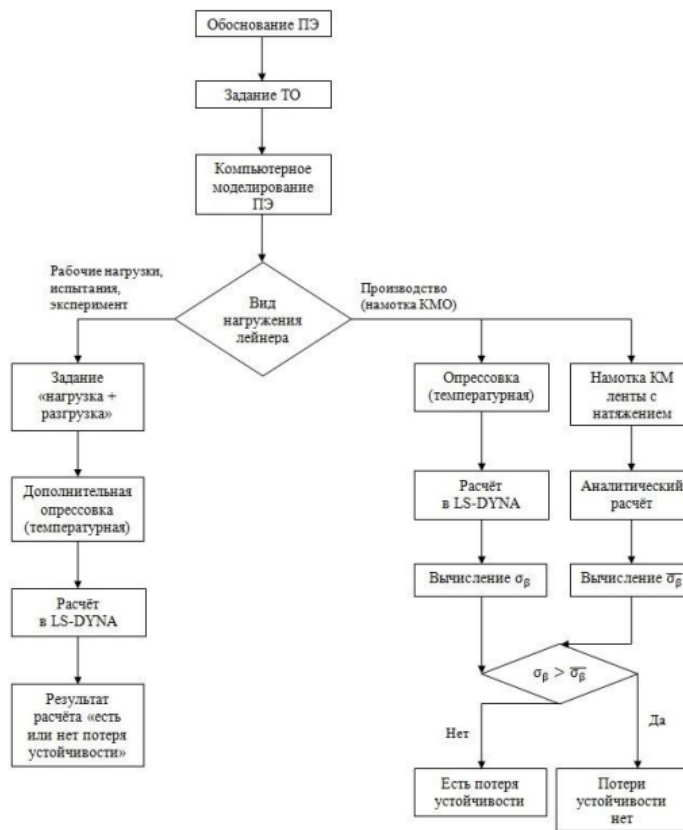


Рис. 1. Структура методики расчета на устойчивость лейнера в составе МК БВД

Происходит разделение нагружения лейнера в МК БВД на два вида: один связан с испытаниями и эксплуатацией МК БВД, другой - с производством, т.е. с намоткой композитной ленты на лейнер.

В первом случае рассматривается нагрузка и разгрузка баллона, во втором — температурная опрессовка лейнера.

Конечно-элементная модель ПЭ (представительный элемент) предусматривает вертикальную и поперечную симметрию баллона, поэтому рассматривается только половина ПЭ. Жесткая обойма моделируется упругим материалом, лейнер - упругопластическим материалом. Диаграмма деформирования материала лейнера построена по справочным характеристикам $\sigma_{ПЦ}$, σ_{02} $\sigma\sigma$ и перестроена в зоне упрочнения в истинную диаграмму. Геометрические связи запрещают только осевое смещение одного из торцов ПЭ (совпадающий с поперечной плоскостью симметрии баллона) и осевые смещения лейнера относительно обоймы (КМО)[1].



Рис. 2. Моделируемая половина конструкции

На двухслойную цилиндрическую оболочку, состоящую из наружной жесткой обоймы и внутреннего упругопластического лайнера, наложены геометрические связи, соответствующие условиям нагружения цилиндрической части МК БВД. Левый торец — свободный, с равными осевыми перемещениями лайнера и обоймы; на правом торце — шарнирно-подвижные опоры на лайнере и обойме, запрещающие только осевые перемещения [2].

Отклонения толщин лайнера и обоймы, равномерные по всей длине конструкции, принимаются в виде вырезов и выступов по несвязанным секторам, что позволяет независимо изменять их протяженности. Температура в лайнере и обойме назначается таким же образом, т. е. по несвязанным секторам. Вариант технологических отклонений в виде промятия лайнера показан на рис. 3.

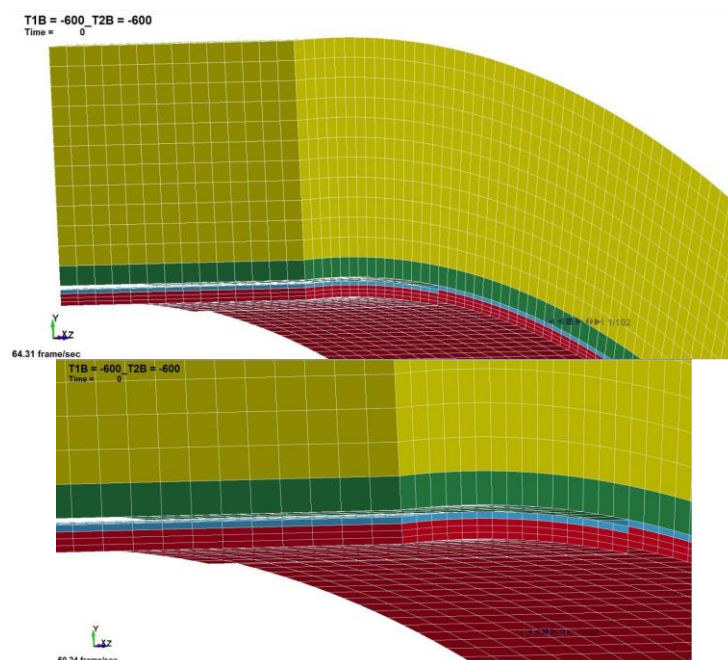


Рис. 3. Конечно-элементная модель лейнера в жесткой обойме

Конструкция ПЭ моделируется с помощью восьмиузловых объемных конечных элементов типа Solid. Численные исследования показали, что при нагреве лейнера в жесткой цилиндрической обойме (без теплового контакта) напряженное состояние в конструкции однородное и потери устойчивости лейнера не происходит, если лейнер и обойма — идеальные, т.е. без технологических отклонений [2].

Для сравнения теории с экспериментом В.В. Васильева, в котором потеря устойчивости стального кольца зафиксирована при 197 °С, в программном комплексе LS-DYNA был проведен конечно-элементный расчет нагрева стального кольца (лейнера) в жесткой обойме (без теплового контакта). В качестве технологических отклонений были выбраны вырезы и выступы в лейнере и обойме различных размеров: по глубине 0,05...0,3 мм, по длине — до 24 мм. Потерю устойчивости лейнера устанавливали по появлению изгибной волны и выпучиванию лейнера в режиме текущего времени; в этот же момент фиксировалась температура лейнера. Разброс температур составил от 200 °С до 240 °С. Отсюда получена погрешность теории до 20 %, что свидетельствует о хорошем согласовании теории и эксперимента [3, 4].

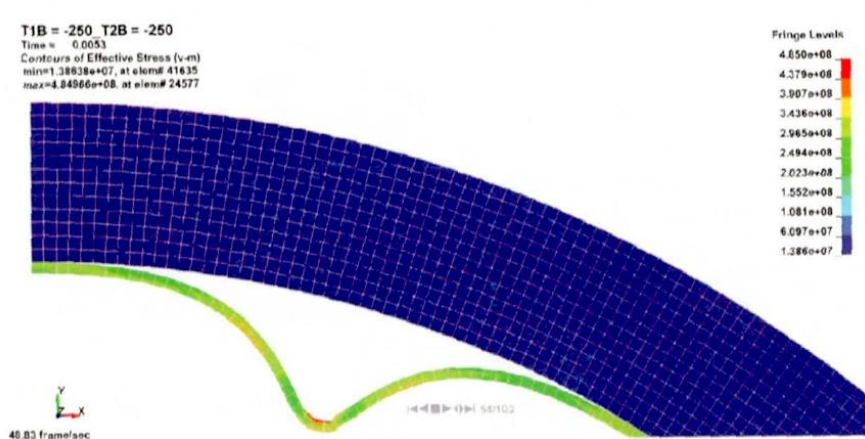


Рис. 4. Формирование ярко выраженного «лепестка»

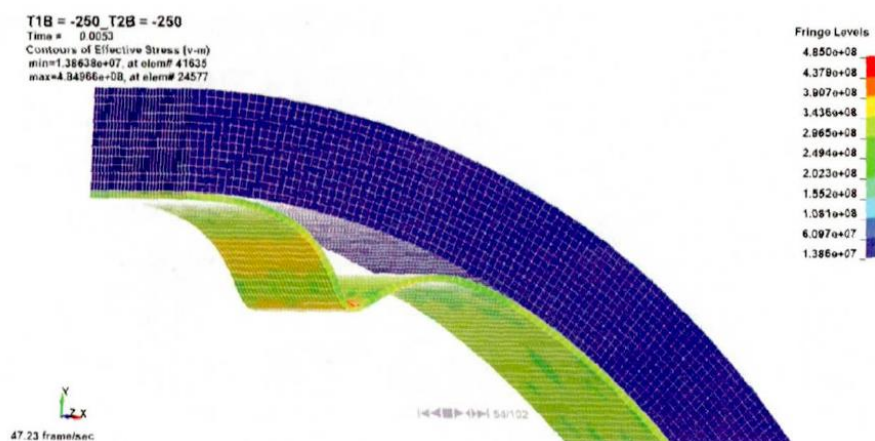


Рис. 5. Поле интенсивности напряжений σ , в лейнере и обойме

Таким образом, была решена задача опрессовки лейнера охлаждаемой обоймой с целью установить этапы процесса деформирования лейнера: начало отслоения, появление волны деформирования, начальное формирование «лепестка» (выпучины), формирование развитого «лепестка» (выпучины большой амплитуды).

Анализ напряженно-деформированного состояния лейнера показал, что в области «лепестка» (рис. 4) существует неоднородное напряженное состояние (рис. 5), в то время как в остальной большей части лейнера — напряженное состояние близко к однородному, причем напряжения здесь значительно меньше.

В результате нашего исследования были сделаны следующие заключения:

1. Введенные в расчетную схему в качестве начальных несовершенств технологические отклонения — вырезы и выступы в лейнере и композитной оболочке — позволили исследовать их влияние на процесс потери устойчивости лейнера в составе МК БВД и получить разброс в 20 % по величине критической нагрузки в заданном интервале размеров технологических отклонений (по глубжю — до 0,3 мм; по длжю — до 24 мм).

2. Разработанная конечно-элементная модель опрессовки лейнера в жесткой охлаждаемой обойме обеспечила решение задачи о потере устойчивости лейнера при намотке па него композитной лепты в условиях производства; сравнение получаемого решения с известным решением о надавливании наматываемых слоев КМО на лейнер позволяет находить коэффициент запаса по устойчивости лейнера.

Список использованных источников:

1. 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. 61–72.

2. Бахвалов Ю.О., Молочев В.П., Половцев В.А. Внедрение технологии фрикционной сварки конструкций из алюминиевых сплавов взамен сварки плавлением // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». 2011. Юбилейный вып. (КБ «Салют»). С. 132–135.

3. Горовенко Л.А. Математические методы компьютерного моделирования физических процессов// Международный журнал экспериментального образования. Пенза: ИД «Академия естествознания», 2017. - №2. - с. 92-93.

4. Васильев В.В., Мороз Н.Г. Композитные баллоны давления. Проектирование, расчет, изготовление и испытания: справ. пособие. М.: Машиностроение; Инновационное машиностроение, 2015. 373 с.