

Received: 19.02.2026

Revised: 22.05.2026

Accepted: 12.06.2026

DOI: 10.17804/2410-9908.2026.4.128-138

ANALYSIS OF THE STABILITY OF A SEALING LINER IN A COMPOSITE PRESSURE VESSEL

A. E. Burov

*Federal Research Center for Information and Computational Technologies,
53 Mira Ave., Krasnoyarsk, 660049, Russia
Institute of Biophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Federal Research Center
"Krasnoyarsk Science Center", SB RAS,
50/50 Akademgorodok St., Krasnoyarsk, 660036, Russia*

 <https://orcid.org/orcid.org/0000-0002-4360-0335>  aeburov@ict.nsc.ru

Email: aeburov@ict.nsc.ru

Address for correspondence: pr-t Mira, 53, Krasnoyarsk, 660049, Russia

Tel.: +7 (391) 227-2912

High-pressure composite vessels consisting of a composite load-bearing shell and a thin sealing liner are widely used in the automotive, aviation, and energy industries due to their high weight efficiency and strength. Their manufacture involves autofrettage, which results in compressive strains in the liner due to a difference in the mechanical properties of the materials of the load-bearing and sealing shells. This paper presents the results of the numerical modeling of the stress-strain state of an elliptical composite vessel during autofrettage, as well as potential local liner buckling due to compressive plastic strains. The vessel is manufactured by continuous helical-hoop winding of five layers of unidirectional composite tape, based on carbon fibers and an epoxy binder, onto a liner. A comparative analysis is performed for several liner materials. It is noted that the non-uniform distribution of stress fields, specific for this type of composite vessels, limits the use of analytical solutions, based on simplified models, for determining liner buckling loads. The main factors influencing the liner stress level and buckling are identified. The results demonstrate the dominant contribution of pressurization load, the deformation properties of liner materials, and the contact conditions at the interface to liner stability. Methods for increasing the liner stability by reducing stress levels during both loading and load relief are discussed. The studies have shown the features of liner deformation during autofrettage, which must be taken into account when designing and analyzing the load-bearing capacity of composite pressure vessels.

Keywords: composite pressure vessel, autofrettage, numerical analysis, stress-strain state, compressive plastic strains, buckling

References

1. Vasiliev, V.V. *Composite Pressure Vessels: Analysis, Design, and Manufacturing*, Bull Ridge Pub., 2009, 690 p.
2. Eko, A.J., Epaarachchi, J., Jewewantha, J., and Zeng, X. A review of type IV composite overwrapped pressure vessels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 109, 551–573. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.02.108.
3. *Nesushchaya sposobnost i bezopasnost metallokompozitnykh bakov kosmicheskikh apparatov* [Load-Bearing Capacity and Safety of Metal-Composite Tanks in Spacecraft, eds., V.V. Moskvichev and N.A. Testodov]. Nauka Publ., Novosibirsk, 2021, 439 p. (In Russian).
4. Phoenix, L. and Kezirian, M.T. Analysis of potential for titanium liner buckling after proof in a large Kevlar/epoxy COPV. In: *50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural*

Dynamics, and Materials Conference, Palm Springs, CA, United States, 4–7 May 2009, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009.

5. Egorov, V.N. and Egorov, A.V. Estimation of the allowable pressure of metal liner pressure testing when winding a composite shell. *Inzhenernyi Zhurnal: Nauka i Innovatsii*, 2019, 2 (86). (In Russian). DOI: 10.18698/2308-6033-2019-2-1854.

6. Gu, F., Xiao, H., Wang, H., Chen, Z., Su, K., Tian, Z., Li, X., and Jin, Y. Research on the nonlinear confined buckling pressure of a thin-walled metal liner with an ovality defect installed inside the composite overwrapped pressure vessels. *Journal of Composites Science*, 2025, 9 (9), 480. DOI: 10.3390/jcs9090480.

7. Zhang, G., Zhu, H., Wang, Q., Zhang, X., Ren, M., Xue, S., and Li, G. Buckling analysis of thin-walled metal liner of cylindrical composite overwrapped pressure vessels with depressions after autofrettage processing. *Science and Engineering of Composite Materials*, 2021, 28 (1), 540–554. DOI: 10.1515/secm-2021-0051.

8. Wu, Q., Zu, L., Wang, P., Liu, Z., Zhang, Q., Zhang, G., Chen, S., Fu, J., Zhou, L., Wang, H., and Li, D. Design and fabrication of carbon-fiber-wound composite pressure vessel with HDPE liner. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2022, 200, 104851. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2022.104851.

9. Zhang, P., Gu, F., Cao, Z., Wang, H., Chen, Z., Xiao, H., Wang, X., and Ma, G. Theoretical and experimental research on the critical buckling pressure of the thin-walled metal liner installed in the composite overwrapped pressure vessel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2024, 212, 105335. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2024.105335.

10. Khan, S. and Kumar, A. Buckling behaviour for advance cylindrical shells (COPV) subjected to extreme pressure conditions: a comprehensive review. *Polymer Composites*, 2025, 46 (9), 7785–7818. DOI: 10.1002/pc.29513.

11. Li, Y.T., Huang, W.J., Zhang, Y.M., Fan, M., Xiao, Z.M., and Li, W.G. Investigation of liner collapse behaviors in Type IV hydrogen storage vessels at different temperatures. *Journal of Energy Storage*, 2025, 129, 117307. DOI: 10.1016/j.est.2025.117307.

12. Wang, X., Zha, Y., Xie, P., and Yang, W. Supplementary theoretical design framework for Type IV hydrogen storage vessel liners: a minimum wall thickness addressing discharge buckling failure. *Clean Energy Science and Technology*, 2025, 3 (3), 447. DOI: 10.18686/cest447.

13. Akula, V.M.K. and Schubert, M.K. Analysis of debonding of filament wound composite pressure vessels. In: *Proceedings of the American Society of Composites–28th Technical Conference*, 2013, 1, pp. 341–354.

14. Kogaev, V.P., Makhutov, N.A., and Gusenkov, A.P. *Raschety detaley mashin i konstruktsii na prochnost i dolgovechnost: spravochnik* [Calculations of Machine Parts and Structures for Strength and Durability: Handbook, ed., K.V. Frolov]. Mashinostroenie Publ., Moscow, 1985, 224 p. (In Russian).

15. Kaplun, A.B., Morozov, E.M., and Shamraeva, M.A. *ANSYS v rukakh inzhenera: prakticheskoe rukovodstvo* [ANSYS in The Hands of An Engineer: A Practical Guide]. Lenand Publ., Moscow, 2024, 272 p. (In Russian).

16. Burov, A.E. Probabilistic modeling of the load-bearing capacity of a composite pressure vessel. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2024, 5, 97–106. DOI: 10.17804/2410-9908.2024.5.097-106. Available at: http://dream-journal.org/issues/2024-5/2024-5_478.html

Подана в журнал: 19.02.2026

УДК 539.3

DOI: 10.17804/2410-9908.2026.4.128-138

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ГЕРМЕТИЗИРУЮЩЕГО ЛЕЙНЕРА В СОСТАВЕ КОМПОЗИТНОГО БАЛЛОНА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

А. Е. Буров

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий»,
пр-т Мира, д. 53, Красноярск, 660049, Россия
Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук,
Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»,
ул. Академгородок, д. 50, стр. 50, Красноярск, 660036, Россия*

 <https://orcid.org/orcid.org/0000-0002-4360-0335>  aeburov@ict.nsc.ru

Электронная почта: aeburov@ict.nsc.ru

Адрес для переписки: пр-т Мира, д. 53, Красноярск, 660049, Россия

Тел.: +7 (391) 227-2912

Композитные баллоны высокого давления, состоящие из композитной силовой оболочки и тонкого герметизирующего лейнера, получили широкое применение в автомобильной промышленности, авиации и энергетике благодаря высокой весовой эффективности и прочности. Их изготовление включает процесс автофреттажа, в результате которого в лейнере возникают сжимающие деформации, обусловленные различием механических свойств материалов силовой и герметизирующей оболочек. В настоящей работе приведены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния композитного баллона эллиптической формы при автофреттировании и возможной потери локальной устойчивости лейнера в результате развития сжимающих пластических деформаций. Баллон изготовлен спирально-кольцевым методом непрерывной намотки на лейнер пяти слоев ленты однонаправленного композита на основе углеродных волокон и эпоксидного связующего. Сравнительный анализ выполнялся для нескольких материалов, используемых для изготовления лейнеров. Отмечается, что неоднородное распределение полей напряжений, характерное для данных композитных баллонов, ограничивает использование аналитических решений для определения нагрузок потери устойчивости лейнера, полученных на упрощенных моделях. Были идентифицированы основные факторы, влияющие на уровень напряжений и потерю устойчивости лейнеров. Полученные результаты свидетельствуют о доминирующей роли уровня первоначальной нагрузки, деформационных свойств материала лейнера и условий взаимодействия компонентов на контактной поверхности в устойчивости лейнера. Обсуждаются способы повышения устойчивости лейнера путем снижения в нем уровня напряжений как на этапе нагружения, так и при разгрузке. Исследования показали особенности деформирования лейнера в процессе автофреттажа, которые необходимо учитывать при проектировании и анализе несущей способности композитных сосудов давления.

Ключевые слова: композитный баллон высокого давления, автофреттаж, численный анализ, напряженно-деформированное состояние, сжимающие пластические деформации, потеря устойчивости

1. Введение

Композитные баллоны высокого давления (КБВД) все чаще используются в автомобильной промышленности, авиации, медицине и энергетике [1, 2]. Их высокая весовая

эффективность, недостижимая для цельнометаллических аналогов, обусловлена прежде всего уникальными показателями удельной прочности и жесткости композитных материалов.

Типичный КБВД состоит из тонкого металлического или полимерного лайнера, гарантирующего герметичность, и композитной силовой оболочки, обеспечивающей прочность и жесткость конструкции, которая формируется на поверхности лайнера методом непрерывной намотки. Их совместное деформирование обуславливает сложный характер напряженно-деформированного состояния (НДС) КБВД и возникновение предельных состояний, нехарактерных для металлических сосудов давления или композитных оболочек в отдельности.

После намотки композитного слоя и полимеризации связующего для КБВД с металлическим лайнером проводят технологическую операцию, известную как автофреттаж и предназначенную для повышения предела текучести материала, увеличения сопротивляемости коррозии и усталостному разрушению. В этом процессе баллон нагружается давлением, превышающим рабочее давление, с последующим сбросом нагрузки (рис. 1). При нагружении материал лайнера деформируется упругопластически, а уровень деформаций зависит от жесткости силового слоя, а также характеристик пластических свойств (предела текучести и параметра упрочнения металла). Композитная оболочка деформируется линейно-упруго на протяжении всего процесса автофреттажа. После сброса давления размеры лайнера за счет остаточных деформаций больше, чем до нагружения, тогда как силовая оболочка пытается вернуться к первоначальной форме. Это приводит к тому, что на лайнер со стороны силового слоя действует внешнее давление, обуславливающее появление в нем сжимающих пластических деформаций, которые могут привести к потере локальной устойчивости и выпучиванию стенки лайнера [3]. Проблема обостряется вследствие эффекта Баушингера, который характеризуется снижением эффективного предела текучести материала при сжатии после пластического деформирования при растяжении [4]. Для КБВД с полимерным лайнером аналогичный сценарий развития НДС возможен при проведении контрольных или пробных испытаний.

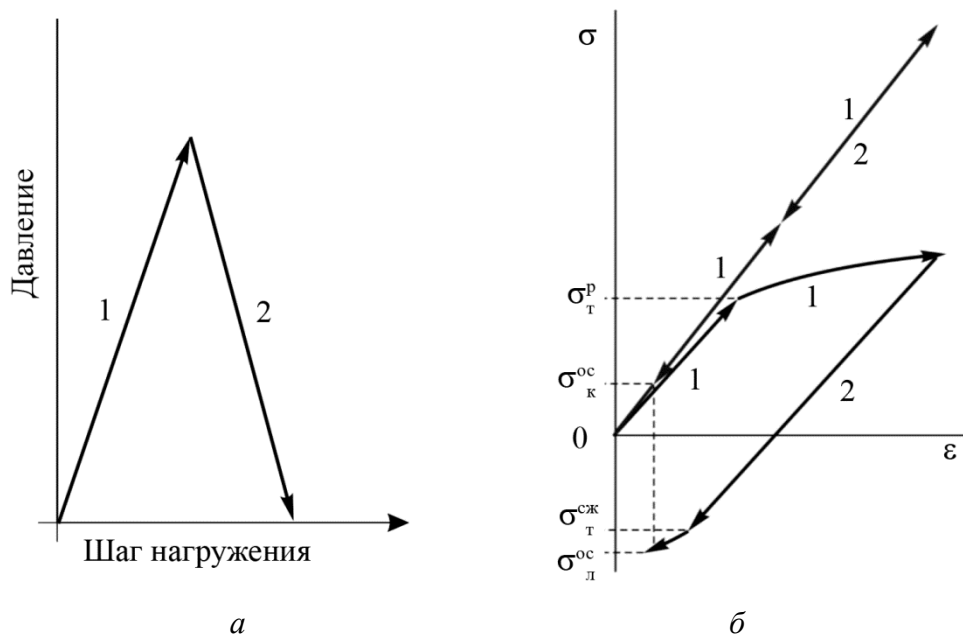


Рис. 1. Схема нагружения в процессе автофреттажа (а) и соответствующее напряженное состояние лайнера и композитной оболочки (б): σ_T^p , $\sigma_T^{сж}$ – предел текучести материала лайнера при растяжении и сжатии, σ_{oc}^c , σ_{oc}^c – остаточные напряжения в лайнере и композите

Помимо процедуры автофреттажа, потеря устойчивости лейнера КБВД может возникать при изменении температуры за счет различия теплофизических свойств компонентов, а также в процессе намотки композитной ленты с натяжением [5, 6].

Выполненные ранее аналитические, численные и экспериментальные исследования устойчивости лейнера в основном были направлены на анализ цилиндрической части КБВД как наиболее подверженной возникновению этого вида предельного состояния [7–12]. Кроме того, постоянная геометрия сечения позволяет использовать упрощенные расчетные схемы. Изучалось влияние таких факторов, как относительная толщина лейнера, свойства материалов, локальные несовершенства и отклонения формы лейнера, возникающие в процессе изготовления КБВД, условия контакта и скорость разгрузки, на критическое давление. Предполагалось, что при разгрузке материал лейнера деформируется упруго, а внешнее давление, создаваемое композитным слоем, однородно на всей поверхности лейнера. Гораздо менее изучена проблема устойчивости лейнера в днищах (концевых участках) КБВД [13]. Между тем в днищах в районе полюсного отверстия устанавливаются фланцы, что является локальным усилением лейнера и приводит к возникновению концентрации и неоднородному распределению напряжений в зоне соединения фланца с мембраной лейнера.

Представленные результаты исследований свидетельствуют о выраженном подкрепляющем эффекте армирующей оболочки, возникающем в результате ограничения (стеснения) свободного деформирования лейнера. Это влечет за собой повышение уровня внешнего давления, необходимого для потери устойчивости стенки лейнера, в несколько раз по сравнению с неармированной оболочкой [10]. В свою очередь, данное явление приводит к тому, что текучесть материала лейнера может возникать при давлении ниже критического, соответствующего линейной потере устойчивости. Подкрепляющий эффект реализуется только при наличии контакта между оболочками КБВД. В случае отсутствия контактного взаимодействия возможно локальное выпучивание стенки лейнера при относительно небольшом внешнем давлении [13].

Настоящая работа посвящена анализу напряженно-деформированного состояния герметизирующего лейнера КБВД в процессе автофреттажа, состоящего из двух этапов: постепенного повышения внутреннего давления до заданного значения с последующим его сбросом до нулевого значения. Целью исследования является оценка влияния уровня первоначальной нагрузки, а также свойств материала на возможную потерю устойчивости лейнера в результате развития сжимающих пластических деформаций. Анализ выполнялся для нескольких материалов, используемых для изготовления лейнеров. Принимается, что предельное внешнее давление – это давление, которое вызывает текучесть в лейнере под действием сжимающих напряжений. В отличие от предыдущих работ по данной тематике, рассматриваются КБВД эллиптического сечения без цилиндрической части с относительно тонким лейнером, который воспринимает малую часть силовой нагрузки. Результаты исследований также применимы для цилиндрических КБВД с днищами подобной или сферической формы. Сложность и комплексность задачи прогнозирования механического отклика конструкции КБВД обуславливает необходимость ее решения численным методом.

2. Постановка задачи и методы решения

Численный анализ выполнен на примере композитного баллона эллиптической формы, изготовленного спирально-кольцевым методом непрерывной намотки пяти слоев ленты однонаправленного композита на основе углеродных волокон и эпоксидного связующего на тонкий лейнер. Геометрия лейнера была рассчитана в соответствии с теорией проектирования оптимальных комбинированных оболочек вращения [1]. Следующие геометрические параметры КБВД использовались в расчетах: максимальный радиус $R = 418$ мм; угол намотки φ_R и толщина слоя композита на экваторе t_R составляют $4,8^\circ$ и 2,5 мм соответственно; радиус полюсно-

го отверстия – 35 мм; толщина лайнера – 1,0 мм и 5,0 мм, соответственно, для металлического и полимерного лайнеров, толщина фланца в районе полюсного отверстия – 8 мм.

Анализ выполнялся для нескольких материалов, используемых для изготовления лайнеров: титановых сплавов BT1-0 и BT14, алюминиевого сплава АМг6 и полиэтилена высокой плотности (ПЭВП). Расчетные характеристики механических свойств и истинные диаграммы деформирования материалов, построенные с использованием степенной аппроксимации [14], представлены в таблице и на рис. 2. Во всех случаях фланец выполнен из сплава BT14.

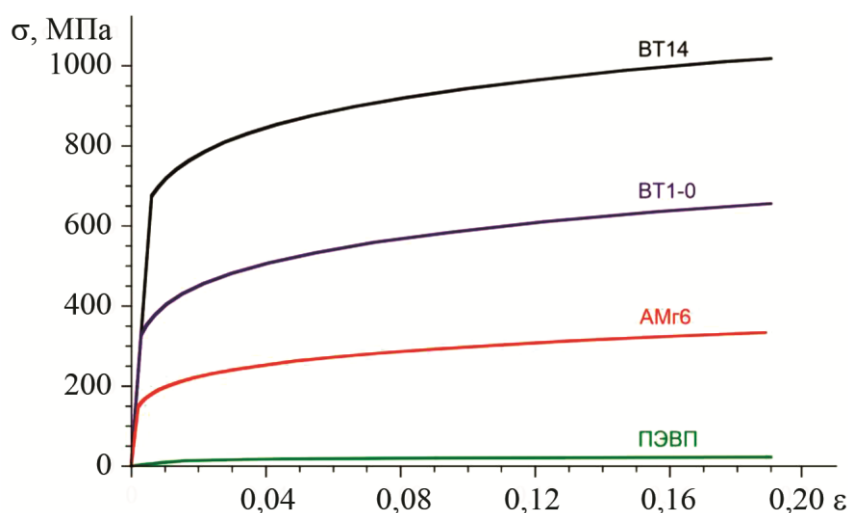


Рис. 2. Кривые деформирования материалов лайнера

Таблица

Характеристики механических свойств материалов

Материал	BT1-0	BT14	АМг6	ПЭВП	Композит
Модуль упругости, ГПа	110	112	71	0,92	$E_1 = 165; E_2 = E_3 = 7,7$
Модуль сдвига, ГПа	41,7	43,1	27,3	0,33	$G_{12} = G_{13} = 3,8; G_{23} = 3,4$
Коэффициент Пуассона	0,32	0,3	0,3	0,39	$\nu_{12} = \nu_{13} = 0,26; \nu_{23} = 0,49$
Предел текучести, МПа	340	700	170	8,6	—

Трехмерная конечно-элементная модель КБВД (рис. 3) разработана в среде пакета инженерного анализа Ansys Mechanical APDL с использованием конечного элемента оболочек второго порядка с опцией слоистого и однородного тела для композита и лайнера соответственно [15]. Учитывая центрально-осевую симметрию геометрии и нагрузки, моделировался только 30-градусный сегмент верхней части конструкции КБВД. Кинематические граничные условия, определяющие симметричность, задавались путем поворота системы координат узлов, находящихся на гранях сегмента. По толщине стенка лайнера и армирующий слой разбиты, соответственно, на 4 и 10 элементов, вдоль образующей – на 250 элементов. Контактное взаимодействие задавалось между внутренней поверхностью композитного слоя и внешней поверхностью лайнера с использованием когезионных элементов в предположении отсутствия трения. Детальное описание процедуры построения модели КБВД приведено в работах [3, 16].

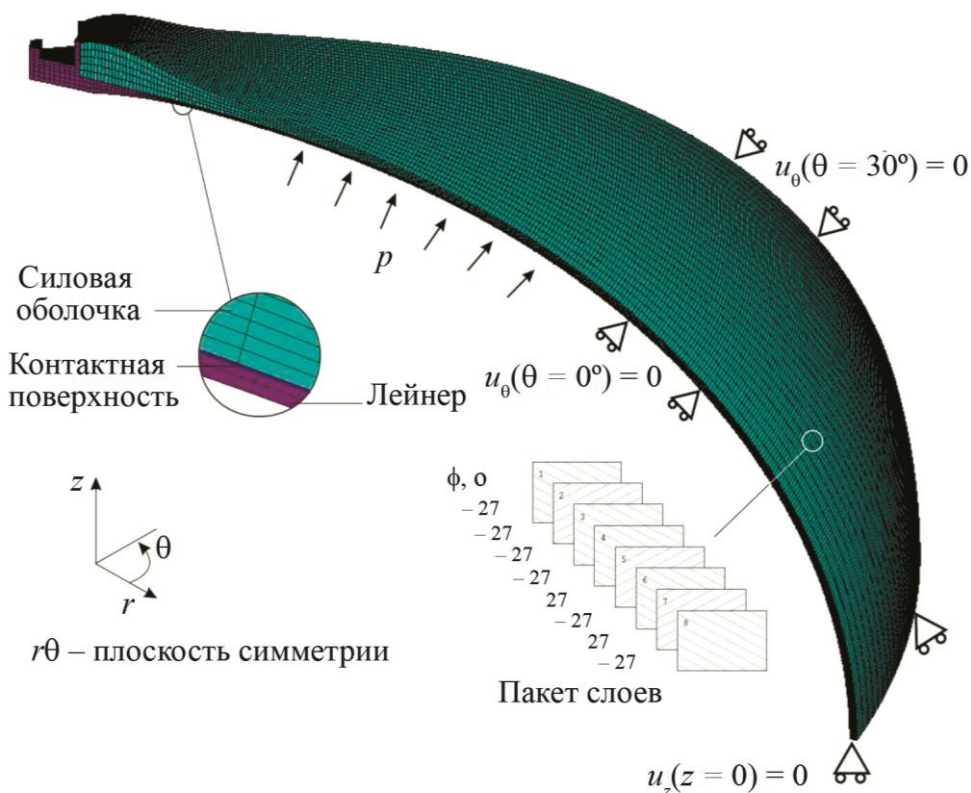


Рис. 3. Конечно-элементная модель КБВД

Цикл процесса автофреттажа (рис. 1) моделировался для каждого из вариантов материала лайнера. В расчетах максимальное давление P на этапе нагружения менялось от 10 до 18 МПа (что соответствует рабочему давлению и давлению разрушения) с шагом 2 МПа. Для анализа использовались значения параметров НДС, действующие в наиболее нагруженной области лайнера – на расстоянии порядка 90 мм от полюсного отверстия.

3. Результаты и обсуждение

Расчетное НДС в цикле «нагрузка – разгрузка» совпадает с описанным выше сценарием формирования сжимающих напряжений в лайнере. На рис. 4 приведены поля напряжений (МПа) в наиболее нагруженной части лайнера, выполненного из ВТ14, для цикла $P = 10\text{--}0$ МПа. Следует отметить неоднородность распределения напряжений вдоль образующей лайнера.

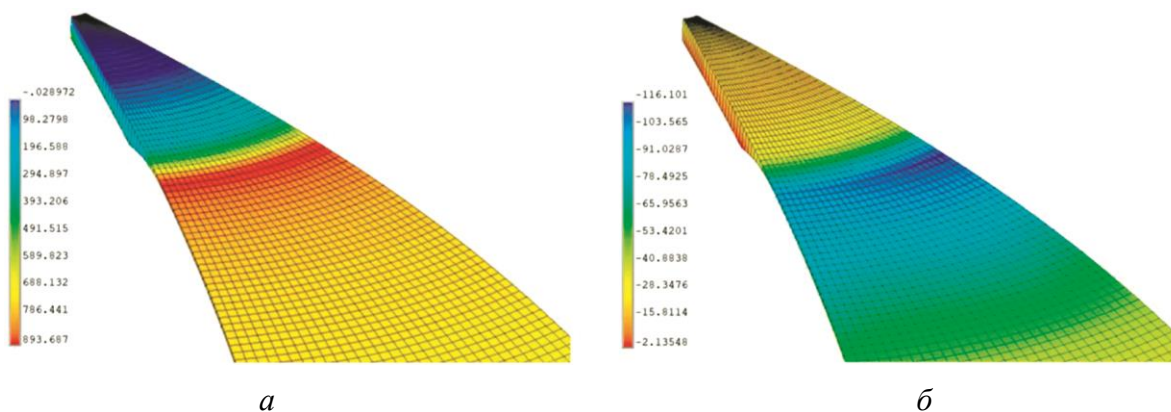


Рис. 4. Распределение напряжений в лайнере: максимальные главные, $P = 10$ МПа (а); минимальные главные, $P = 0$ МПа (б)

Данные расчетов, приведенные на рис. 5, дают представление о характере деформирования лайнера для различного уровня начального давления и используемого материала. Звездочкой на графиках обозначена локальная потеря устойчивости стенки лайнера в зоне действия максимальных сжимающих напряжений, форма которой представлена на рис. 6.

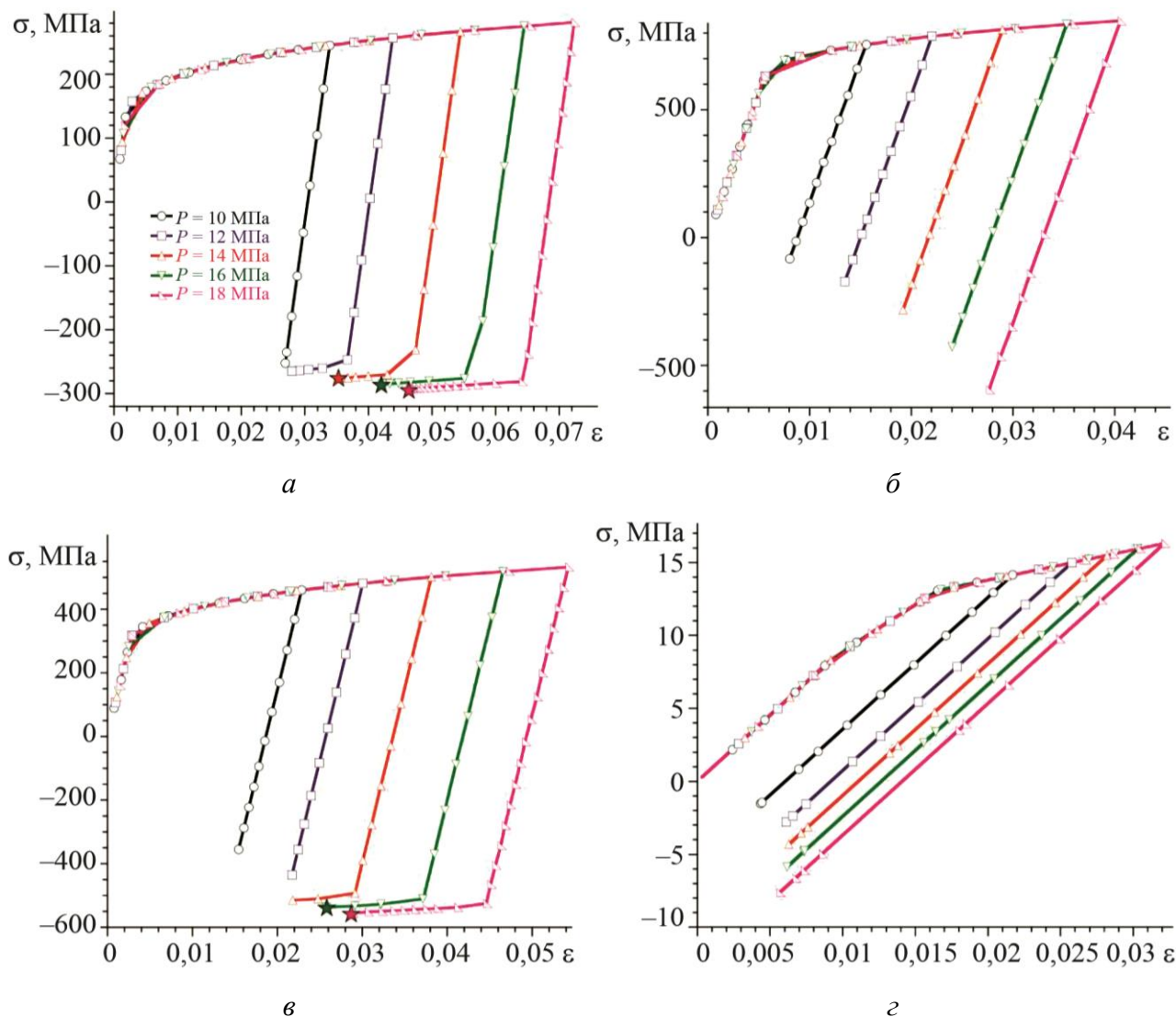


Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние материала лайнера:
АМг6 (а); ВТ14 (б); ВТ1-0 (в); ПЭВП (г)

Представленные результаты свидетельствуют о повышении величины остаточных сжимающих напряжений в лайнере при возрастании давления автофреттажа независимо от используемого материала. Однако, возникновение и уровень пластических деформаций в лайнере, а также связанная с ними потеря устойчивости напрямую определяются пределом текучести материала. Вследствие этого для лайнера из сплава АМг6 (рис. 5 а) пластичность на этапе разгрузки возникает уже при начальном давлении 12 МПа, тогда как в случае сплава ВТ1-0 (рис. 5 в) это явление возникает при $P = 14$ МПа. Лайнер из ВТ14 (рис. 5 б) с наибольшим пределом текучести при разгрузке деформируется линейно-упруго для всего рассмотренного диапазона значений давления автофреттажа.

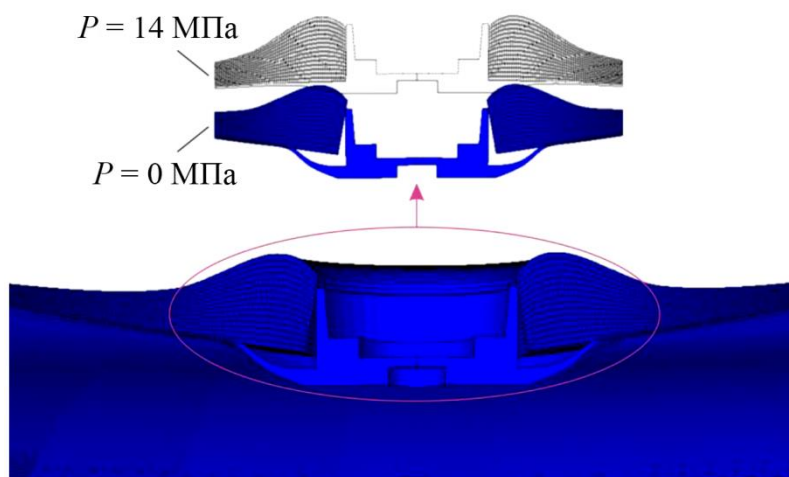


Рис. 6. Деформированный контур КБВД с лейнером из сплава АМг6 после разгрузки с давления $P = 14$ МПа

Помимо характеристик пластичности материала, возникновение в лейнере сжимающих пластических деформаций зависит от его доли в общей нагрузке, воспринимаемой КБВД, которая в свою очередь определяется соотношением жесткостей силовой и герметизирующей оболочек. Это хорошо видно на примере полимерного лейнера (рис. 5 з), материал которого хоть и обладает наименьшим значением предела текучести, но за счет малого, по сравнению с композитом, модуля упругости несет незначительную долю нагрузки. В результате этого в лейнере сжимающие напряжения не превышают значения предела текучести при любом уровне начального давления.

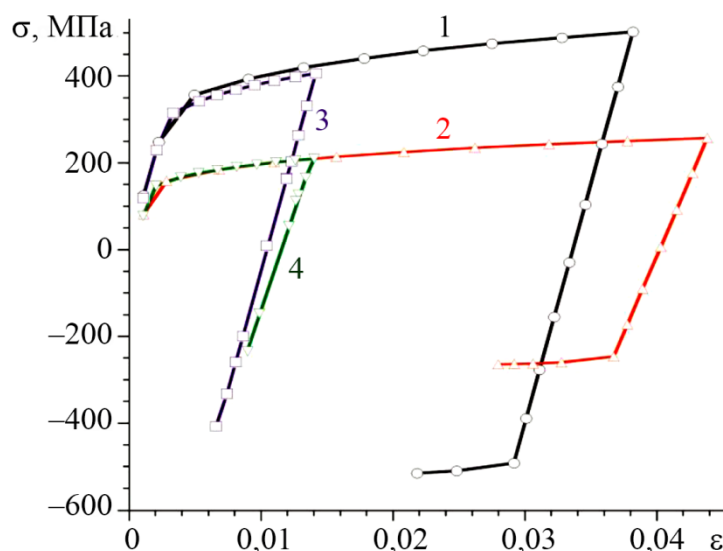


Рис. 7. Кривые деформирования материала лейнера при различных условиях контакта: 1, 3 – ВТ1-0, $P = 14$ МПа; 2, 4 – АМг6, $P = 12$ МПа; 1, 2 – относительное скольжение оболочек; 3, 4 – совместное деформирование

Одной из возможностей предотвращения пластического деформирования лейнера при разгрузке является создание условий совместного (без относительного скольжения) деформирования композитной оболочки и лейнера, например, путем нанесения на лейнер адгезионного слоя. На рис. 7 приведены кривые деформирования лейнера из ВТ1-0 и АМг6, выполненные для вариантов идеального контакта между оболочками и при их скольжении относительно друг друга. Очевидно, что при идеальном контакте изменение формы лейнера

контролируется только деформацией композитного слоя, что ведет к снижению в нем уровня напряжений как на этапе нагружения, так и при разгрузке.

Другой способ повышения стабильности лайнера заключается в увеличении жесткости силовой оболочки за счет использования композитов с более высоким модулем упругости или увеличения толщины армирующего слоя. Моделирование процесса автофреттажа, выполненное для аналогичного КБВД с силовой оболочкой из семи слоев и лайнером из ВТ1-0, показало, что давление этапа нагружения, при котором в лайнере при разгрузке не возникают пластические деформации, превышает 16 МПа. В случае пятислойной силовой оболочки такое условие выполняется только для $P = 12$ МПа (рис. 5 в). Очевидным недостатком такого способа снижения деформирования лайнера является увеличение массы и стоимости КБВД.

4. Заключение

Настоящая работа посвящена численному моделированию напряженно-деформированного состояния композитного баллона эллиптической формы при автофреттировании и возможной потере устойчивости лайнера в результате развития сжимающих пластических деформаций. Выполненные исследования показали особенности деформирования лайнера, которые необходимо учитывать при проектировании и анализе несущей способности композитных сосудов давления. По результатам работы можно сделать следующие выводы.

При определенном сочетании уровня давления на этапе нагружения и характеристик механических свойств компонентов композитных баллонов высокого давления при сбросе нагрузки в лайнере могут возникать сжимающие деформации, превышающие предел текучести материала.

Сложное неоднородное напряженно-деформированное состояние, характерное для КБВД при автофреттже, ограничивает использование аналитических решений для определения нагрузок потери устойчивости лайнера, полученных на упрощенных моделях композитных баллонов.

Для металлических лайнеров вероятность потери устойчивости в результате формирования сжимающих пластических деформаций выше, чем для их аналогов из полимерных материалов.

Уровень внешнего давления на лайнер со стороны армирующего слоя на этапе разгрузки зависит от соотношения жесткостей оболочек и условий контактного взаимодействия.

Использование материалов с более высоким пределом текучести во многом решает проблему стабильности лайнера в цикле «давление – разгрузка».

Локальная потеря устойчивости лайнера в процессе автофреттажа может не являться причиной отказа КБВД в целом, однако снижает его долговечность при его дальнейшем циклическом нагружении.

Литература

1. Vasiliev V. V. Composite Pressure Vessels: Analysis, Design, and Manufacturing. – Bull Ridge Pub., 2009. – 690 p.
2. A review of type IV composite overwrapped pressure vessels / A. J. Eko, J. Epaarachchi, J. Jewewantha, X. Zeng // International Journal of Hydrogen Energy. – 2025. – Vol. 109. – P. 551–573. – DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.02.108.
3. Несущая способность и безопасность металлокомпозитных баков космических аппаратов / под ред. В. В. Москвичева, Н. А. Тестоедова. – Новосибирск : Наука, 2021. – 440 с.
4. Phoenix L., Kezirian M. T. Analysis of potential for titanium liner buckling after proof in a large Kevlar/epoxy COPV // 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Palm Springs, CA, United States, 4–7 May 2009. – American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009.

5. Егоров В. Н., Егоров А. В. Оценка допустимого давления опрессовки металлического лайнера при намотке композитной оболочки // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2019. – № 2. – DOI: 10.18698/2308-6033-2019-2-1854.
6. Research on the nonlinear confined buckling pressure of a thin-walled metal liner with an ovality defect installed inside the composite overwrapped pressure vessels / F. Gu, H. Xiao, H. Wang, Z. Chen, K. Su, Z. Tian, X. Li, Y. Jin // Journal of Composites Science. – 2025. – Vol. 9. – P. 480. – DOI: 10.3390/jcs9090480.
7. Buckling analysis of thin-walled metal liner of cylindrical composite overwrapped pressure vessels with depressions after autofrettage processing / G. Zhang, H. Zhu, Q. Wang, X. Zhang, M. Ren, S. Xue, G. Li // Science and Engineering of Composite Materials. – 2021. – Vol. 28. – P. 540–554. – DOI: 10.1515/secm-2021-0051.
8. Design and fabrication of carbon-fiber-wound composite pressure vessel with HDPE liner / Q. Wu, L. Zu, P. Wang, Z. Liu, Q. Zhang, G. Zhang, S. Chen, J. Fu, L. Zhou, H. Wang, D. Li // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2022. – Vol. 200. – 104851. – DOI: 10.1016/j.ijpvp.2022.104851.
9. Theoretical and experimental research on the critical buckling pressure of the thin-walled metal liner installed in the composite overwrapped pressure vessel / P. Zhang, F. Gu, Z. Cao, H. Wang, Z. Chen, H. Xiao, X. Wang, G. Ma // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2024. – Vol. 212. – 105335. – DOI: 10.1016/j.ijpvp.2024.105335.
10. Khan S., Kumar A. Buckling behaviour for advance cylindrical shells (COPV) subjected to extreme pressure conditions: a comprehensive review // Polymer Composites – 2025. – Vol. 46 (9). – P. 7785–7818. – DOI: 10.1002/pc.29513.
11. Investigation of liner collapse behaviors in Type IV hydrogen storage vessels at different temperatures / Y. Li, W. J. Huang, Y. M. Zhang, M. Fan, Z. M. Xiao, W. G. Li // Journal of Energy Storage. – 2025. – Vol. 129. – 117307. – DOI: 10.1016/j.est.2025.117307.
12. Supplementary theoretical design framework for Type IV hydrogen storage vessel liners: a minimum wall thickness addressing discharge buckling failure / X. Wang, Y. Zha, P. Xie, W. Yang // Clean Energy Science and Technology. – 2025. – Vol. 3. – P. 447. – DOI: 10.18686/cest447.
13. Akula V. M. K., Schubert M. K. Analysis of debonding of filament wound composite pressure vessels // Proceedings of the American Society of Composites–28th Technical Conference. – 2013. – 1. – P. 341–354.
14. Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. – М. : Машиностроение, 1985. – 224 с.
15. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Шамраева М. А. ANSYS в руках инженера: практическое руководство. – Москва : Ленанд, 2024. – 272 с.
16. Burov A. E. Probabilistic modeling of the load-bearing capacity of a composite pressure vessel // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2024. – Iss. 5. – P. 97–106. – DOI: 10.17804/2410-9908.2024.5.097-106. – URL: http://dream-journal.org/issues/2024-5/2024-5_478.html