

Формы возможных отслоений лайнера в металлокомпозитном баллоне высокого давления

© А.В. Егоров

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Для составных металлокомпозитных баллонов давления предложена схема программного расчета расслоений на базе программного комплекса LS-DYNA в динамической постановке. Конструкция разбивается на объемные конечные элементы типа SHELL и SOLID, в нее вводятся технологические отклонения, учитывается односторонняя связь на поверхности контакта. Анализ расслоений проводится на примере баллона с углепластиковой оболочкой и алюминиевым лайнером в технологическом процессе термообработки баллона. Показано, что при определенных температурах нагрева баллона в нем могут происходить отслаивания лайнера от жесткой композитной оболочки, связанные с локальной потерей устойчивости металлического тонкостенного лайнера в местах наличия технологических отклонений. Отслаивания имеют вид складок (внутреннего прогиба), по форме подразделяющихся на кольцевые и радиальные на днищах и на контурные (переходящие в продольные) на цилиндрической части лайнера. Приведен временной процесс образования складок на поверхности лайнера при термообработке баллона (видео).

Ключевые слова: металлокомпозитный баллон давления, металлический лайнер, расслоение, локальная потеря устойчивости, термообработка, расчет баллона

Введение. Внедрение металлокомпозитных баллонов высокого давления (МК БВД) в космическую технику вызывает необходимость более точного прогнозирования несущей способности таких баллонов [1]. Одним из определяющих факторов несущей способности является возможность отслоения внутренней металлической тонкостенной оболочки (лайнера) от наружной жесткой композитной оболочки. Подобный механизм нарушения монолитности баллона может проявляться как на этапе изготовления баллона, так и на этапе его эксплуатации. Нарушение целостности путем расслаивания [2] относится к недопустимым дефектам, что свидетельствует о важности заявленной задачи.

Цель настоящей работы — проанализировать известные исследования и дать расчетное обоснование формам возможных отслоений лайнера от металлокомпозитной оболочки в баллонах высокого давления.

Исследования по составным баллонам проводились отечественными и зарубежными учеными [3–8]. В первую очередь рассматривались вопросы выбора материалов для газонепроницаемого метал-

лического лайнера и силовой композитной оболочки, разработки конструктивных решений, проектирования и расчета составных баллонов. В меньшей степени известны исследования в области технологии изготовления МК БВД и связанных с этим проявлений производственных дефектов. Вопросы монолитности конструкции баллонов рассматривались в основном применительно к повреждаемости композитных оболочек и не затрагивались механизмы возможного отслоения лайнера от композитного баллона.

В обобщенном виде отличительные особенности МК БВД нашли отражение в книге [2], в которой приведены теоретические и экспериментальные исследования авторов. В качестве объекта исследования выбран углепластиковый баллон с алюминиевым лайнером, идентичный конструкциям, которые применяются в космической технике. В работе отмечены возможные отслоения от композитной оболочки на всех стадиях производства и эксплуатации баллонов.

Похожие задачи, но применительно к составным трубчатым конструкциям, решались в работе [9], авторы которой анализировали поведение металлического лайнера, окруженного жесткой средой и нагруженного гидростатическим давлением. Применение плоских конечных элементов при моделировании конструкции в программном комплексе ABAQUS позволило авторам этих работ определить непрерывный процесс деформирования лайнера с возникновением внутренней складки, характерной при локальной потере устойчивости оболочки. Однако этот программный расчет сильно ограничен исходной выбранной моделью цилиндрической конструкции и не может быть применен к анализу расслоений в МК БВД.

Согласно проведенным исследованиям [2, 9], задача расслоения в МК БВД с учетом всех производственных и эксплуатационных особенностей должна решаться в численных программных комплексах в объемной постановке.

Схема расчета. При построении схемы расчета будем опираться на программный подход, изложенный в работах [10–12], в виде трех положений: 1) вводятся технологические отклонения на характеристики элементов составного баллона в пределах заданных допусков; 2) решается объемная задача; 3) решение ищется в режиме реального времени.

Именно программный подход позволяет рассматривать перечень параметров, включаемых в исходные данные, для проведения более подробного анализа напряженно-деформированного состояния МК БВД. При этом отсутствует необходимость изменять конечно-элементную модель баллона, что-либо перестраивать. С увеличением числа задаваемых параметров достаточно просто добавлять соответствующие команды.

На основе данного подхода, как было показано, удастся представить конструкцию баллона в трехмерном виде, учесть геометрические и механические свойства реального баллона и представить результаты в динамике.

Рассмотрим цилиндрический баллон с днищами. Будем считать, что металлический лейнер имеет постоянную толщину, изготовлен из упругопластического материала.

Наружная композитная оболочка баллона представляет собой многослойную структуру с увеличенной толщиной цилиндрической части и переменной толщиной на днищах. Полюсные отверстия днищ подкреплены жесткими стальными кольцами, имитирующими фланцы.

Баллон симметричен относительно плоскости, перпендикулярной к его оси и делящей баллон пополам. Поэтому для сокращения размерности задачи возьмем половину баллона (рис. 1).

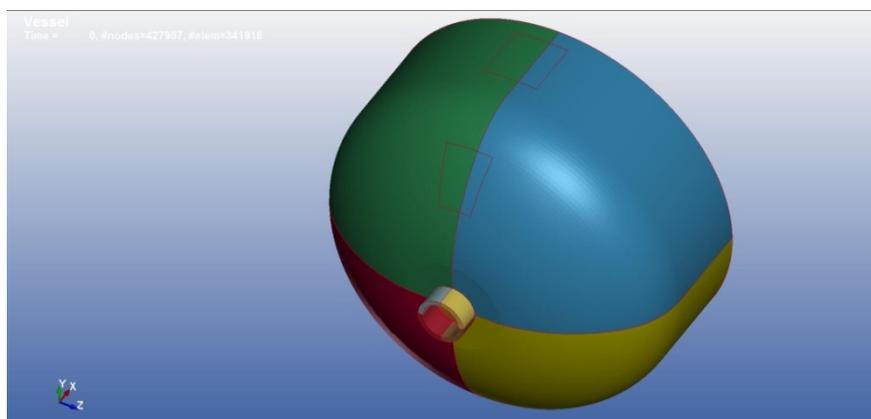


Рис. 1. Расчетная схема баллона

Несимметричные технологические отклонения введены по одному на цилиндре и на днище вдоль одного меридиана (рис. 2).

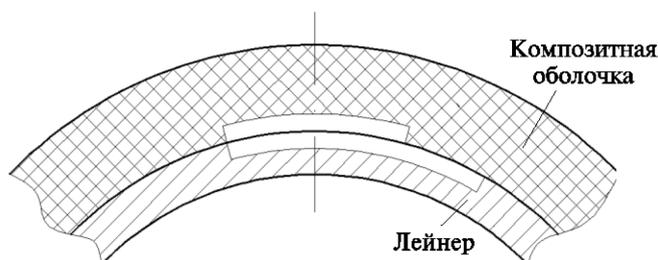


Рис. 2. Несимметричное отклонение в виде вырезов в композитной оболочке и лейнере

Вся конструкция баллона разбивается на объемные конечные элементы типа SHELL для лайнера и композитной оболочки, типа SOLID — для жесткого полюсного кольца. На контактной поверхности лайнер — композитная оболочка введена односторонняя связь по нормали, отсутствует связь в касательной плоскости. Технологические отклонения задаются через специально предусмотренные граничные слои конечных элементов. Расчеты на базе сформированной конечно-элементной модели проводятся в программном комплексе LS-DYNA в динамической постановке с учетом команды глобального демпфирования. Изменением механических свойств материалов при нагреве пренебрегаем.

Нагрузки подразделяются на силовые (при эксплуатации баллона) и температурные (при изготовлении баллона). Подробнее остановимся на температурных нагрузках, моделирующих воздействие композитной оболочки на лайнер в технологическом процессе производства металлокомпозитного баллона методом намотки композитной ленты препрега на лайнер с последующей термообработкой. С целью конкретизации расчета выберем процесс термообработки баллона.

Ввиду разных коэффициентов линейного термического расширения у композитной оболочки и лайнера при нагреве конструкции баллона металлический лайнер будет давить на композитную оболочку. Создаваемое контактное давление на граничной поверхности лайнер — композитная оболочка способно деформировать лайнер так, что на его поверхности возможно появление складок, характеризующих локальную потерю устойчивости лайнера. Поскольку жесткость композитной оболочки выше по сравнению с жесткостью лайнера, форма этой оболочки при нагреве практически не искажается. Поэтому при анализе механического поведения лайнера в составе МК БВД в процессе нагрева удобно результаты расчетов представлять в виде изображений лайнера, для чего использовать визуализацию с условно снятой композитной оболочкой. Такой прием дает возможность показывать на деформированной поверхности лайнера распределение напряжений, деформаций и перемещений.

Для того чтобы проследить изменение напряженно-деформированного состояния лайнера во времени, примем линейный закон изменения температуры нагрева баллона от 0 до 140 °С. Температуре $T \approx 0$ °С соответствует исходное ненапряженное состояние баллона. Отметим, что если за начальную температуру взять $T \approx 20$ °С, то нагрев углепластикового баллона при термообработке будет проводиться до $T \approx 160$ °С.

Анализ результатов. Рассмотрим МК БВД цилиндрической формы с углепластиковой оболочкой и алюминиевым лайнером толщиной 2,2 мм. Габаритные размеры баллона приведены ниже:

Длина вместе с днищами, мм	400
Максимальный диаметр на цилиндре, мм	388
Диаметр наружной цилиндрической поверхности лайнера, мм	364

Баллон подвергается рекомендуемому при термообработке нагреву на $\Delta T \approx 140$ °С, а для оценки возможного перегрева принимается $\Delta T \approx 220$ °С.

На начальном этапе нагрева МК БВД (до $T \approx 140$ °С) видимых изменений формы лайнера не наблюдается, что свидетельствует о допустимости выбранного режима термообработки для экспериментально отработанного баллона с углепластиковой оболочкой с точки зрения отслоения лайнера от композитной оболочки. Повышение температуры до значений $T \approx 150...160$ °С ведет к зарождению складок на днищах и на цилиндре лайнера (рис. 3). На днищах намечаются два вида складок — кольцевые, в окрестности жесткого полюсного кольца, и радиальные, на купольной части днищ около технологических отклонений.

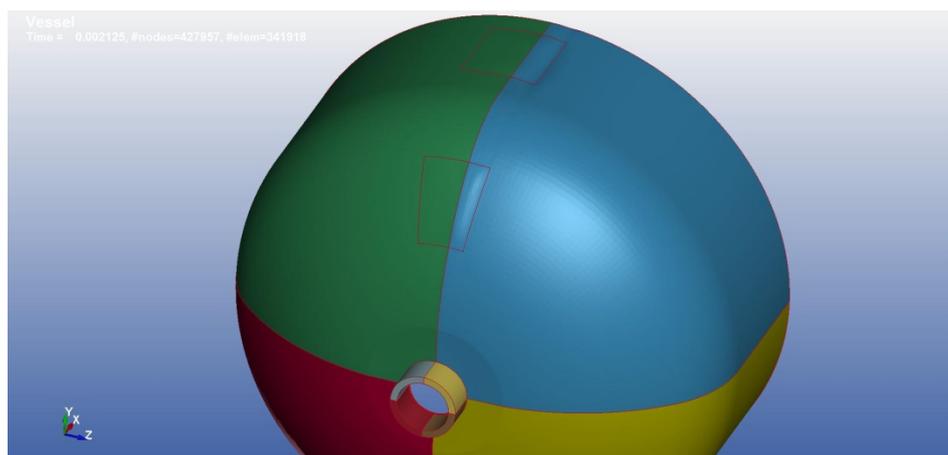


Рис. 3. Формы локальной потери устойчивости лайнера ($T \approx 160$ °С)

На цилиндре лайнера формируется контурная складка по периметру технологического отклонения. При нагреве баллона до температуры $T \approx 220$ °С заметно увеличивается амплитуда контурных складок и проявляются кольцевые и радиальные складки (рис. 4).

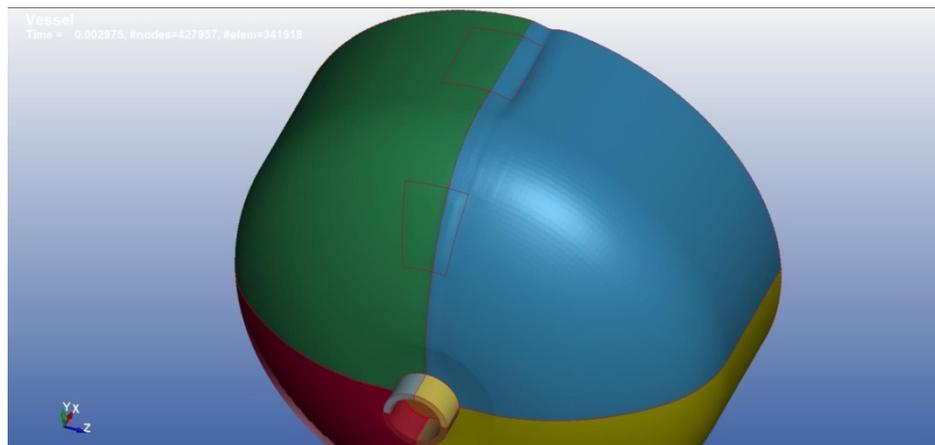


Рис. 4. Формы локальной потери устойчивости лейнера при $T \approx 220$ °С

Дальнейшее повышение температуры баллона сопровождается возрастанием амплитуд всех складок, а контурная складка на цилиндре вырождается в продольную (рис. 5).

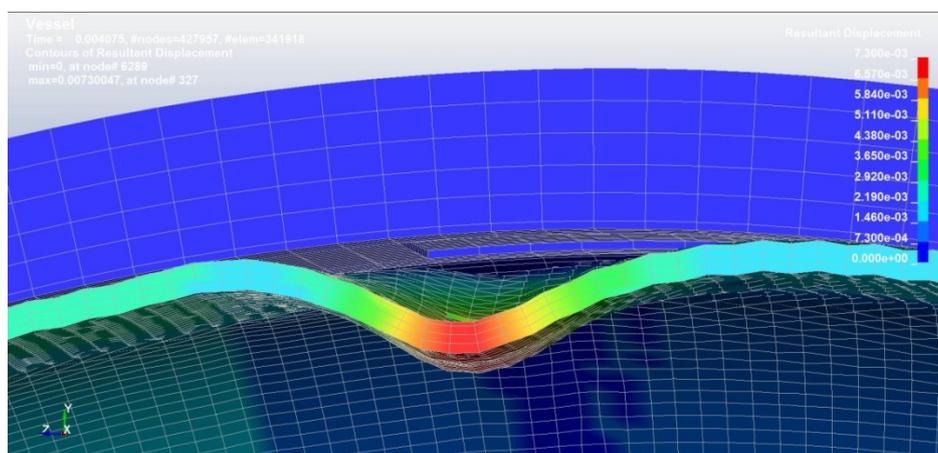


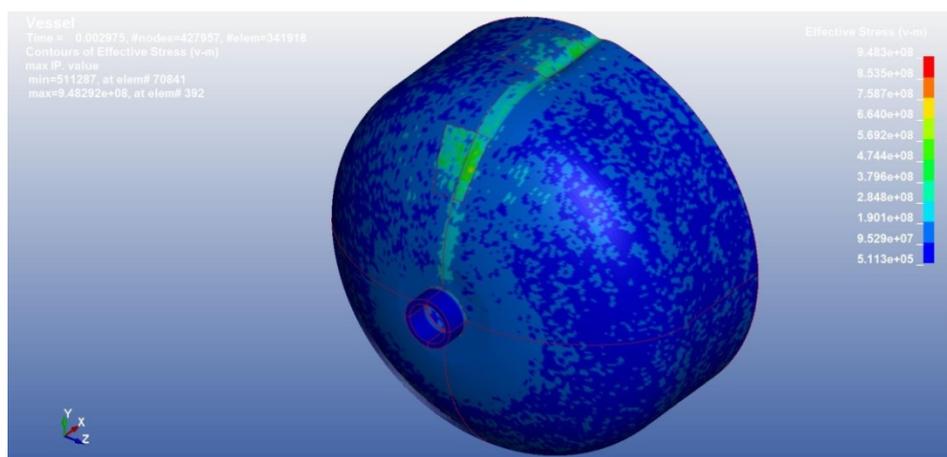
Рис. 5. Продольные складки на цилиндрическом лейнере при $T \approx 300$ °С

Малые амплитуды кольцевых и радиальных складок объясняются тем, что расчет выполнялся для баллона, термообработка которого производилась в технологической оснастке, т. е. с установленным центральным жестким стержнем, препятствующим вдавливанию фланцев при нагреве баллона. Специально проведенные расчеты показали, что без такого технологического стержня амплитуды кольцевых и радиальных складок значительно больше.

Таким образом, при термообработке цилиндрического МК БВД в лайнере могут возникать складки локальной потери устойчивости трех видов: кольцевые, радиальные и контурные, способные переходить в продольные. Число радиальных и контурных складок определяется числом введенных технологических отклонений. Поэтому в реальных МК БВД, в которых технологических отклонений больше одного, на днищах при термообработке баллонов проявляется несколько радиальных складок. Изложенное подтверждается результатами экспериментов с МК БВД, выполненных В.В. Васильевым и Н.Г. Морозом [2], в ходе которых получено по несколько радиальных складок на каждом из днищ баллонов.

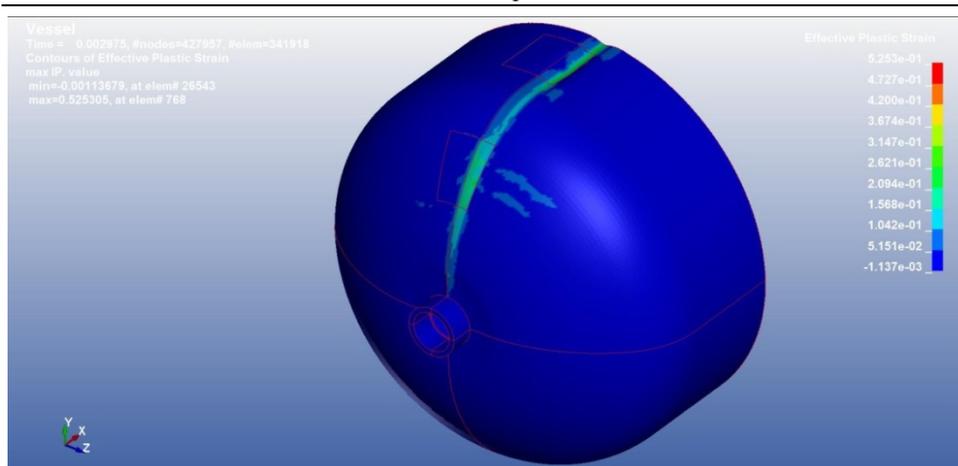
Отмеченные формы складок (отслоений) лайнера при термообработке МК БВД наблюдаются и при нештатной эксплуатации баллонов и при изготовлении баллонов намоткой на металлический лайнер композитной ленты с увеличенным натяжением.

Процесс деформирования лайнера при термообработке баллона можно представить во времени (см. [ВИДЕО](#)), где прослеживается непрерывное формоизменение поверхности лайнера. Соответственно, во времени изменяются напряжения Мизеса, полные пластические деформации и полные перемещения. Пики напряжений, деформаций и перемещений сосредоточены в зонах складок (рис. 6). Здесь напряжения и деформации могут достигать критических значений.

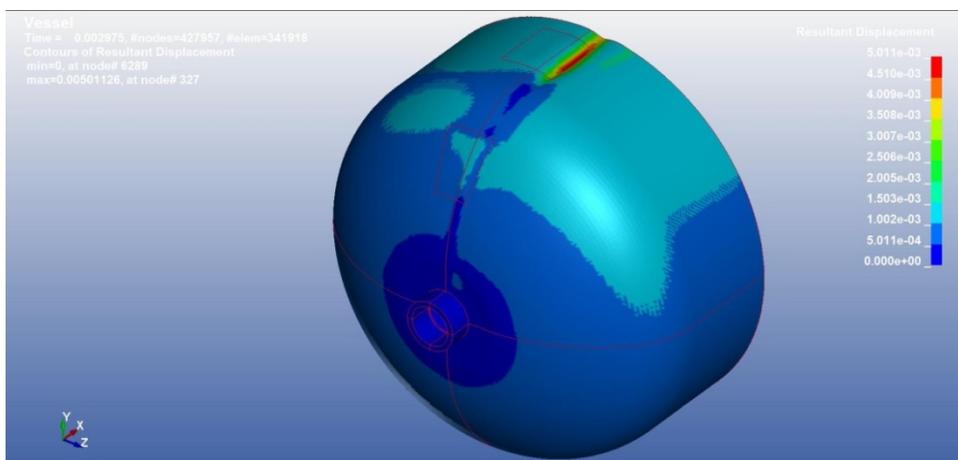


a

Рис. 6 (начало). Распределение напряжений Мизеса (a) по поверхности лайнера



б



в

Рис. 6 (окончание). Распределение остаточных пластических деформаций (б) и полных перемещений (в) по поверхности лейнера

Заключение. Выполненные расчетные исследования показали, что в цилиндрических МК БВД тонкостенный металлический лейнер способен локально терять устойчивость путем внутренних прогибов как на цилиндрической части баллона, так и на днищах. Прогибы имеют вид складок, которые по форме подразделяют на кольцевые, радиальные и контурные, переходящие в продольные. Кольцевые складки обусловлены наличием жесткого полюсного кольца, вокруг которого они и располагаются. Радиальные и контурные (продольные) складки вызваны имеющимися технологическими отклонениями, около которых они формируются. Число таких складок зависит

от количества и расположения на днищах и цилиндре баллона технологических отклонений.

Формы складок локальной потери устойчивости лайнера изучались в данной работе на примере решения задачи термообработки баллона с углепластиковой оболочкой и алюминиевым лайнером в программном комплексе LS-DYNA в динамической постановке с применением объемных конечных элементов типов SHELL и SOLID. Полученные из расчетов баллонов формы складок качественно совпадают с экспериментально [1] обнаруженными. Величина амплитуд складок, характеризующих эффект отслоения лайнера от композитной оболочки в баллоне, определяется уровнем контактного давления между лайнером и углепластиковой оболочкой. В общем случае само контактное давление может иметь различную природу: технологическую (намотка и термообработка баллона) или эксплуатационную (подача и сброс давления).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Vasiliev V.V. *Composite pressure vessels — Analysis, design and manufacturing*. Blacksburg, Bull Ridge Publ., 2009, 704 p.
- [2] Васильев В.В., Мороз Н.Г. *Композитные баллоны давления. Проектирование, расчет, изготовление и испытания: справ. пособие*. Москва, Машиностроение; Инновационное машиностроение, 2015, 373 с.
- [3] Смердов А.А., Селезнев В.А., Соколов С.В., Смердов А.А., Логачева А.И., Тимофеев А.Н., Логачев А.В. Разработка высокоэффективных композитных баллонов давления с гранульным титановым лайнером для изделий ракетно-космической техники. *Конструкции из композиционных материалов*, 2015, № 2 (138), с. 15–22.
- [4] Тарасов В.А., Бараев А.В., Комков М.А. Унификация шар-баллонов высокого давления РКТ комбинированной конструкции с композитной оболочкой и металлическим лайнером. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2015, № 1 (658), с. 31–41.
DOI: 10.18698/0536-1044-2015-1-31-41
- [5] Marzbanrad J., Paykani A., Afkar A., Ghajar M. Finite element analysis of composite high-pressure hydrogen storage vessels. *J. Mater. Environ. Sci.*, 2013, 4 (1), pp. 63–74.
- [6] Liu P.F., Chu J.K., Hou S.J., Xu P., Zheng J.Y. *Numerical simulation and optimal design for composite highpressure hydrogen storage vessel: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, no. 16, 1817.
- [7] Nunes P.J., Velosa J.C., Antunes P.J., Silva J.F., Marques A.T. Studying the production of filament wound composite pressure vessels. *16th International Conference on Composite Materials (ICCM-16)*, Kyoto, Japan. 2007.
- [8] Zheng J.Y., Liu X.X., Xu P., Liu P.F., Zhao Y.Z., Yang J. Development of high pressure gaseous hydrogen storage technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, no. 37, 1048.
- [9] Vasilikis D., Karamanos S.A. Mechanics of Confined Thin-Walled Cylinders Subjected to External Pressure. *Applied Mechanics Reviews, ASME*, 2014, vol. 66, Article Number 010801.

- [10] Егоров А.В., Егоров В.Н. Оценка допустимого давления опрессовки металлического лайнера при намотке композитной оболочки. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 2.
DOI: 10.18698/2308-6033-2019-2-1854
- [11] Egorov A.V. Studying rigidity of the welded liner — composite shell construction. *2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **537** 022030.
DOI: 10.1088/1757-899X/537/2/022030
- [12] Егоров А.В., Егоров В.Н. Устойчивость нагретого кольца в жесткой обойме. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2019, № 3, с. 62–77. DOI: 10.18698/0236-3941-2019-3-62-77

Статья поступила в редакцию 12.07.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Егоров А.В. Формы возможных отслоений лайнера в металлокомпозитном баллоне высокого давления. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 8.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-8-1911>

Егоров А.В. — канд. техн. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

e-mail: antegor177@mail.ru

SPIN-code 7513-3026 ORCID iD 0000-0002-7401-5534

Forms of possible delamination of the liner in a metal composite high pressure vessel

© A.V. Egorov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The paper offers a calculation scheme of delaminating occurring in complex metal composite pressure vessels. The calculation is carried out in LS-DYNA software in dynamic formulation using 3D-finite-element discretization of the SHELL- and SOLID-types. Technological deviations have been introduced into the computational scheme, in which a unilateral constraint on the surface contact area is also taken into consideration. The analysis of delaminating is carried out by example of a vessel with a carbon-plastic shell and an aluminium liner in the process of thermal treatment of the vessel. It is shown that at certain heating temperatures of the vessel, liner delamination from the rigid composite shell may occur. Delamination is due to local buckling of the metal thin-walled liner occurring in the areas of technological deviations. Delamination has the form of folds (internal deflection), which in the form are subdivided into annular and radial folds on the bottoms and into the contour (turning into longitudinal) folds on the cylindrical part of the liner. Temporal process of wrinkling on the liner surface during heat treatment of the vessel is shown ([video](#)).

Keywords: metal composite pressure vessel, metal liner, delamination, local buckling, thermal treatment, vessel calculation

REFERENCES

- [1] Vasiliev V.V. *Composite pressure vessels — Analysis, design and manufacturing*. Blacksburg, Bull Ridge Publ., 2009, 704 p.
- [2] Vasilev V.V., Moroz N.G. *Kompozitnye ballony davleniya. Proektirovanie, raschet, izgotovlenie i ispytaniya: spravochnoe posobie* [Composite pressure cylinders. Designing, calculating, manufacturing and testing: a reference book]. Moscow, Mashinostroenie: Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2015, 373 p.
- [3] Smerdov An.A., Seleznev V.A., Sokolov S.V., Smerdov Al.A., Logacheva A.I., Tinofeev A.N., Logacheva A.V. *Razrabotka vysokoeffektivnykh kompozitnykh ballonov davleniya s granul'nym titanovym leynerom dlya izdeliy raketno-kosmicheskoy tekhniki* [The development of high-performance composite cylinders with granular titanium liner for articles of rocket and space technology]. *Konstrukcii iz kompozitsionnykh materialov — Composite materials constructions* (CM), 2015, no. 2 (138), pp. 15–22.
- [4] Tarasov V.A., Baraev A.V., Komkov M.A. Standardization of spherical high-pressure vessels comprising composite shells and metallic liners. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2015, no. 1 (658), pp. 31–41. DOI: 10.18698/0536-1044-2015-1-31-41
- [5] Marzbanrad J., Paykani A., Afkar A., Ghajar M. Finite element analysis of composite high-pressure hydrogen storage vessels. *J. Mater. Environ. Sci.*, 2013, 4 (1), pp. 63–74.
- [6] Liu P.F., Chu J.K., Hou S.J., Xu P., Zheng J.Y. Numerical simulation and optimal design for composite high pressure hydrogen storage vessel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, no. 16, 1817.

- [7] Nunes P.J., Velosa J.C., Antunes P.J., Silva J.F., Marques A.T. Studying the production of filament wound composite pressure vessels. *16th International Conference on Composite Materials (ICCM-16)*, Kyoto, Japan, 2007.
- [8] Zheng J.Y., Liu X.X., Xu P., Liu P.F., Zhao Y.Z., Yang J. Development of high pressure gaseous hydrogen storage technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, no. 37, 1048.
- [9] Vasilikis D., Karamanos S.A. Mechanics of Confined Thin-Walled Cylinders Subjected to External Pressure. *Applied Mechanics Reviews, ASME*, 2014, vol. 66, Article Number 010801.
- [10] Egorov V.N., Egorov A.V. Estimation of the allowable pressure of metal liner pressure testing when winding a composite shell. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 2. DOI: 10.18698/2308-6033-2019-2-1854
- [11] Egorov A.V. Studying rigidity of the welded liner — composite shell construction. *2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 537 022030. DOI: 10.1088/1757-899X/537/2/022030
- [12] Egorov A.V., Egorov V.N. Buckling of a Heated Ring Enclosed in a Rigid Case. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2019, no. 3, pp. 62–77. DOI: 10.18698/0236-3941-2019-3-62-77

Egorov A.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: antegor177@mail.ru
SPIN-code 7513-3026 ORCID iD 0000-0002-7401-5534