

Оценка допустимого давления опрессовки металлического лейнера при намотке композитной оболочки

© В.Н. Егоров¹, А.В. Егоров²

¹ОАО НИАТ, Москва, 117587, Россия

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Исследована локальная потеря устойчивости лейнера в результате расслоения, которая может возникать на различных этапах производства, в том числе при намотке на лейнер композитной ленты с натяжением. Для решения задачи оценки допустимого давления опрессовки лейнера предложена методика двух расчетов, ориентированная на использование температурной аналогии. В методике реализовано замыкание решений на контактное давление и устойчивость лейнера через общий параметр — кольцевое напряжение в лейнере в зоне напряженного состояния, близкого к однородному. Контактное давление многослойной композитной оболочки на лейнер определено по величине задаваемого натяжения наматываемой композитной ленты. Расчет устойчивости лейнера выполнен в программном комплексе LS-DYNA в динамической постановке при задании охлаждения наружной оболочки. Проведен расчет на расслоение средней части цилиндрического металлокомпозитного баллона высокого давления; показаны варианты с отслоением лейнера от композитной оболочки и без отслоения.

Ключевые слова: *металлокомпозитный баллон, устойчивость лейнера, давление опрессовки лейнера, расслоение металлокомпозитного баллона, напряженно-деформированное состояние, модель деформирования*

Введение. В ракетно-космической отрасли предъявляют повышенные требования к несущей способности применяемых металлокомпозитных баллонов высокого давления (МК БВД). Одной из важных причин снижения функциональных качеств баллонов может стать отслоение металлического лейнера от наружной композитной оболочки. Локальная потеря устойчивости может наблюдаться при расслоении лейнера на этапе изготовления МК БВД, при намотке на лейнер композитной ленты с натяжением, а также при эксплуатации МК БВД, когда происходит циклическое нагружение и разгрузка конструкции. В настоящей работе рассматривается расслоение в средней части цилиндрического МК БВД при его изготовлении.

Цель работы — предложить методику определения допустимого давления опрессовки лейнера при намотке на него композитной ленты с натяжением. Основу методики составляет сравнение двух расчетов напряженно-деформированного состояния, полученных из решения задачи контактного давления композитной оболочки на циклический лейнер и задачи локальной потери устойчивости лейнера,

окруженного жесткой обоймой. В известных публикациях по двухслойным баллонам и оболочкам [1–14] отсутствует такая постановка задачи опрессовки лейнера.

Контактное давление. Вопросы контактного давления на металлический лейнер наматываемой композитной оболочки подробно исследованы в работе [1]. В ней учитываются число слоев, углы укладки и сила натяжения композитной ленты, взаимное влияние слоев.

Будем считать, что основными напряжениями в лейнере, в цилиндрической части МК БВД, являются кольцевые напряжения σ_μ , которые напрямую влияют на локальную устойчивость лейнера. Пусть силы натяжения спиральных T_φ и кольцевых T_{90} лент разные. Тогда окружные напряжения $\bar{\sigma}_\beta$ в лейнере можно вычислить по формуле [1]:

$$\bar{\sigma}_\beta = -\frac{2T_\varphi r_\varphi N_\varphi}{h_m w_\varphi} \sin^2 \varphi - \frac{\bar{E} T_{90} r_{90} N_{90}}{B w_{90}} (B_{11} - \nu B_{12}). \quad (1)$$

Здесь r_φ и r_{90} — редуцированные коэффициенты, отражающие снижение напряжений в лейнере при намотке многослойной оболочки; N_φ — число двойных спиральных слоев с углами $\pm\varphi$; N_{90} — число элементарных слоев в кольцевом слое баллона; $\bar{E} = \frac{E}{(1-\nu^2)}$; h_m — толщина лейнера; w_φ, w_{90} — ширина наматываемой ленты; $B = B_{11}B_{22} - B_{12}^2$; B_{11}, B_{12} — коэффициенты жесткости.

Формула (1) дает возможность определять кольцевые напряжения $\bar{\sigma}_\beta$ в лейнере до момента потери устойчивости лейнера, т. е. когда в нем существует однородное напряженное состояние.

Отметим, что в технологическом процессе изготовления МК БВД после намотки композитной ленты на лейнер производится термообработка баллона для полимеризации связующего в композитной оболочке. В лейнере при этом возникают температурные напряжения σ_β^T , которые также влияют на устойчивость лейнера, но в этой работе они не рассматриваются.

Устойчивость. Задачу локальной потери устойчивости лейнера, окруженного жесткой обоймой, решаем с применением программного комплекса LS-DYNA в динамической постановке [15, 16]. Прессовое давление на лейнер будем создавать путем охлаждения наружной обоймы, имитирующей композитную оболочку. Для этого вычисляем приведенные механические характеристики обоймы по заданной структуре пакета многослойной композитной оболочки (число слоев

и углы укладки лент) и задаем условный коэффициент линейного расширения, обеспечивающий эффективную, с точки зрения расчетов, опрессовку (обжатие) лейнера, т. е. достаточные радиальные перемещения обоймы при разумном уровне отрицательных температур. В расчетной схеме считается, что между лейнером и обоймой размещен тепловой изолятор, поэтому охлаждение обоймы на лейнер не передается. Задача теплопроводности здесь не решается.

Примененный прием температурной аналогии позволяет создать в лейнере сжимающие напряжения, соответствующие напряжениям от давления наматываемой на лейнер многослойной композитной оболочки.

Модель деформирования системы лейнер — обойма включает геометрическую и физическую нелинейность лейнера и обоймы, одностороннюю связь лейнера и обоймы и наличие в них технологических отклонений. Односторонняя связь предполагает наличие сухого (без связующего) контакта лейнера и обоймы по нормали к поверхности их сопряжения при давлении охлаждаемой обоймы на лейнер и отсутствие контакта — при отслоении лейнера от обоймы. Касательных взаимодействий лейнера и обоймы нет. Физическая нелинейность учитывается через использование стандартной диаграммы деформирования материала, перестраиваемой в истинную. Геометрическая нелинейность предполагает наличие больших перемещений и поворотов.

В качестве технологических отклонений принимаем во внимание геометрические погрешности изготовления конструкции, лежащие в пределах заданных допусков. На практике обычно считается, что погрешность толщины листа лежит в пределах 10 %. Поэтому в этих пределах задаем геометрические погрешности схематично в виде локальных вырезов и выступов в лейнере и обойме [15].

Метод расчета лейнера на устойчивость основан на анализе пространственного напряженно-деформированного состояния конструкции в функции времени. Для расчета выбираем объемные конечные элементы [15], которые соответствуют разбивке конструкции по толщине цилиндрическими поверхностями, по длине — поперечными плоскостями, по окружности — радиальными плоскостями.

По полученной конечно-элементной сетке возможно определение напряженно-деформированного состояния в любой точке конструкции лейнер — обойма. Расчеты проводятся в программном комплексе LS-DYNA в динамической постановке. Это позволяет находить компоненты тензоров напряжений, деформаций и вектора перемещений в функции времени, что необходимо для установления момента потери устойчивости лейнера. В качестве внешней нагрузки задается отрицательная температура обоймы.

Результатом этого программного расчета является определение полного напряженно-деформированного состояния конструкции, в том числе и кольцевых напряжений σ_β в лейнере в функции времени с установлением его критического значения, т. е. величины, при которой лейнер теряет устойчивость.

Давление опрессовки. Давление опрессовки лейнера создается намоткой на лейнер композитной ленты с натяжением. С увеличением силы натяжения ленты возрастает и сила давления наматываемой многослойной композитной оболочки на лейнер, что может приводить к его локальной потере устойчивости в виде внутреннего прогиба.

Оценку допустимого давления опрессовки удобно делать на основе методики двух расчетов, структура которой представлена на рис. 1.

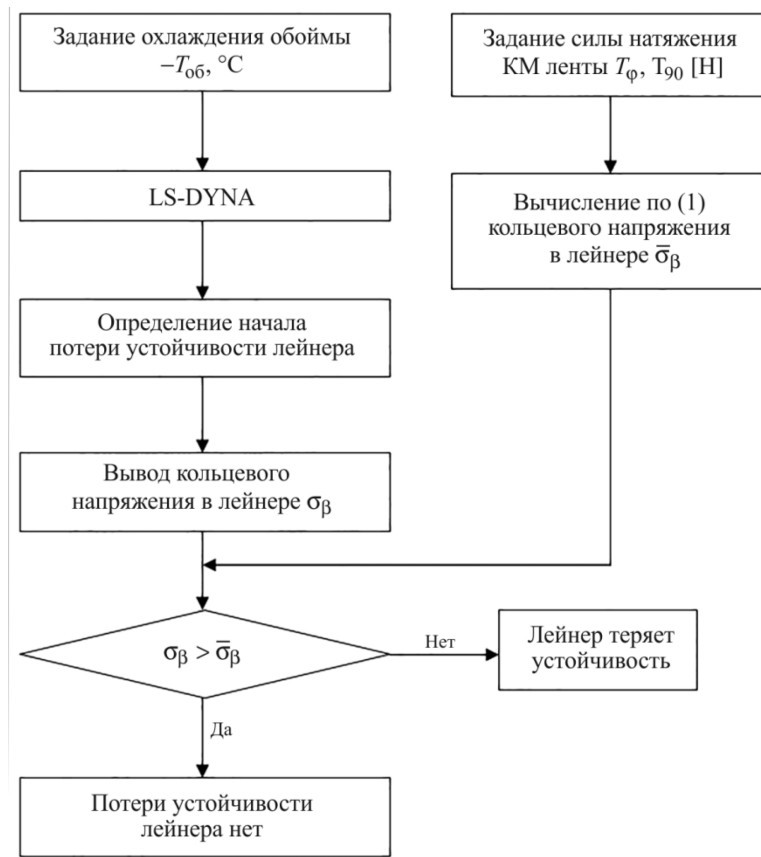


Рис. 1. Структура методики расчета на устойчивость лейнера при намотке многослойной композитной оболочки

В ней расчеты контактного давления и устойчивости замыкаются через единый физически ясный параметр — кольцевое напряжение σ_β в лайнере. Как показано выше, этот параметр однозначно характеризует, с одной стороны, уровень давления опрессовки лайнера и, с другой стороны, — момент начала потери устойчивости лайнера. Из сравнения кольцевого напряжения $\bar{\sigma}_\beta$, рассчитанного по алгоритму намотки (1), и кольцевого напряжения σ_β , вычисленного по программе LS-DYNA в зоне напряженного состояния, близкого к однородному, следует вывод о возникновении или невозникновении потери устойчивости лайнера.

Анализ результатов. Выполним исследование на устойчивость лайнера при намотке на него композитной ленты в средней части цилиндрического МК БВД. Пренебрежем влиянием днищ баллона и изменением механических характеристик многослойной композитной оболочки (со спиральной и кольцевой укладкой лент) в процессе отверждения связующего.

Пусть МК БВД представляет собой двухслойную оболочку, в которой внутренний слой (лейнер) изготовлен из алюминиевого сплава АМг-6, наружный слой — намоткой углепластиковой ленты на основе волокон ISM-60 и эпоксидного связующего ЭД-У.

Вычислим упругие характеристики анизотропной модели материала композита (с неотвержденным связующим) и заданной структуры многослойного пакета углепластиковой композитной оболочки [1] по методике [1] с написанием программы в Mathcad. Результаты расчетов приведены ниже:

$$\begin{array}{llll}
 E_x = 50,19 \text{ ГПа} & G_{xy} = 8,711 \text{ ГПа} & \nu_{xy} = 0,037 & \nu_{yz} = 0,28 \\
 E_y = 98,38 \text{ ГПа} & G_{yz} = 5,2 \text{ ГПа} & \nu_{yx} = 0,073 & \nu_{zx} = 0,05 \\
 E_z = 9 \text{ ГПа} & G_{xz} = G_{yz} & \nu_{xz} = 0,28 & \nu_{zy} = 0,026
 \end{array}$$

Для алюминиевого лайнера взяты следующие значения:

Предел пропорциональности σ_n , МПа	135
Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	160
Предел прочности σ_b , МПа	369
Предельное удлинение δ , %	20

В MATLAB по этим значениям построена диаграмма деформирования сплава АМг-6 (рис. 2, а), которая затем перестроена в истинную (рис. 2, б).

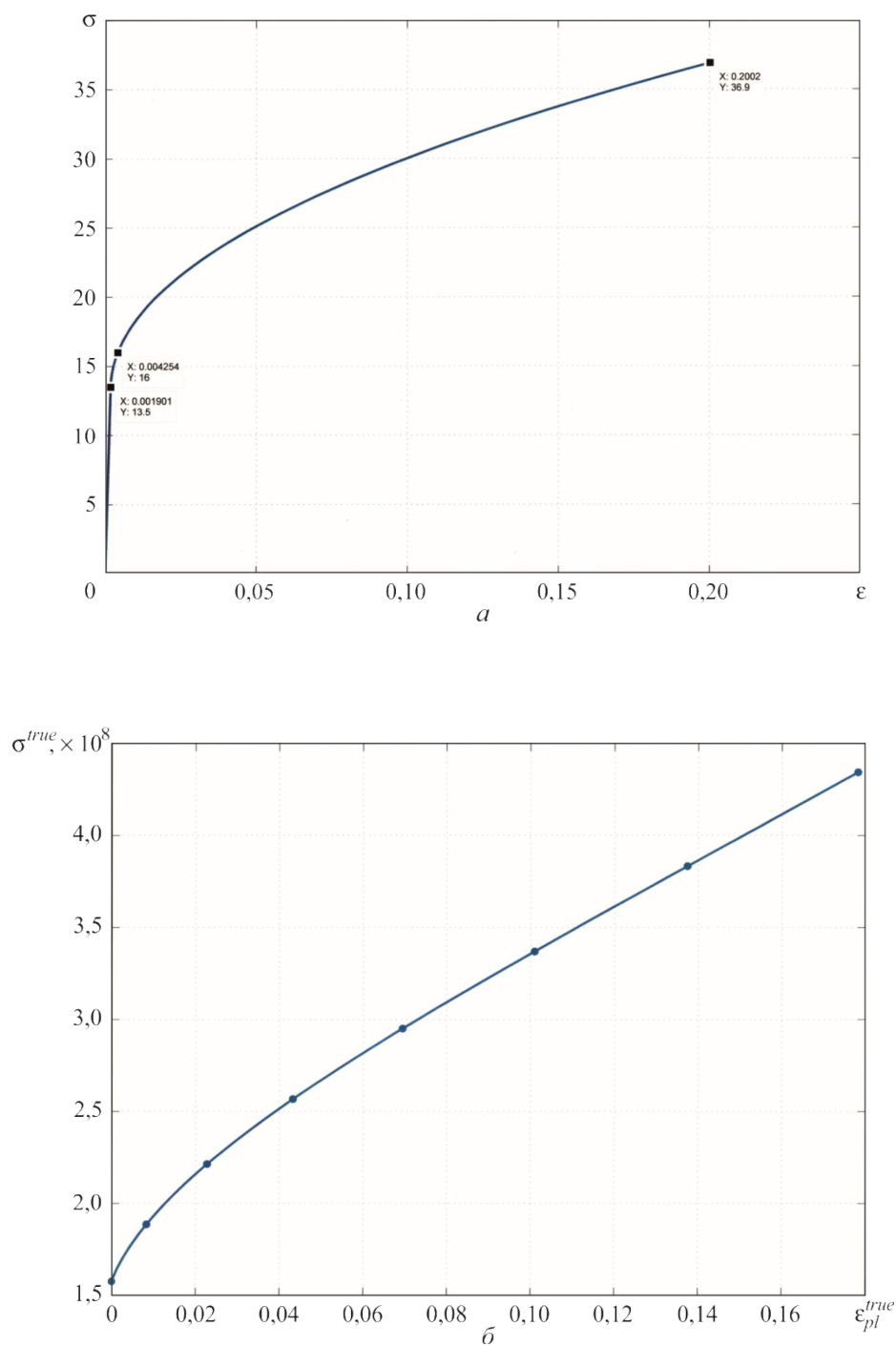


Рис. 2. Стандартная (a) и истинная (b) диаграммы деформирования сплава АМг-6

Сжимающее давление охлаждаемой обоймы (композитной обложки) на лейнер задаем посредством двух параметров: условного коэффициента линейного расширения обоймы и величины отрицательной температуры обоймы. Цель этих параметров — обеспечить необходимое радиальное обжатие (опрессовку) лейнера, при котором лейнер начинает терять устойчивость. Соотношение между этими двумя параметрами подбираем расчетным путем.

Для найденных характеристик рассматриваемого МК БВД с алюминиевым лейнером и углепластиковой оболочкой в работе [1] решена задача о контактном давлении обоймы на лейнер и определено кольцевое напряжение $\bar{\sigma}_\beta$ в лейнере. При намотке углепластиковой ленты шириной 16 мм с натяжением $T_\phi = T_{90} = 500$ Н на цилиндрический лейнер диаметром 364,4 мм получено $\bar{\sigma}_\beta = -41,5$ МПа.

Далее численно в программном комплексе LS-DYNA решается задача устойчивости сжимаемого лейнера. По графику изменения во времени напряжений Мизеса (рис. 3) устанавливается момент потери устойчивости лейнера и зона напряженного состояния лейнера, близкая к однородному. В частности, такая зона существует на уровне четверти окружности от верхней части лейнера [15], где наблюдается внутренняя локальная потеря устойчивости лейнера в форме «лепестка». Возьмем в этой зоне однородного напряженного состояния лейнера конечный элемент 3250 (рис. 4) и выведем для него график изменения кольцевых напряжений σ_β в лейнере в функции времени. В момент потери устойчивости лейнера критическое напряжение в лейнере $\sigma_{\beta к} = -179$ МПа.

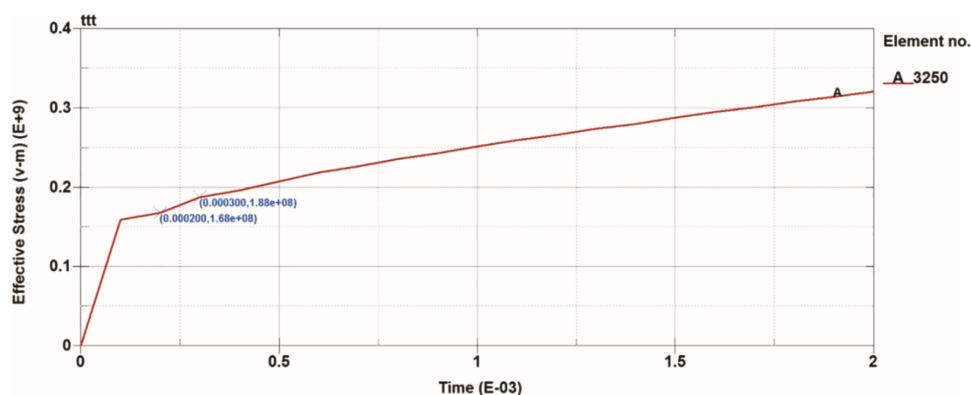


Рис. 3. Изменение во времени напряжений Мизеса в лейнере для элемента 3250

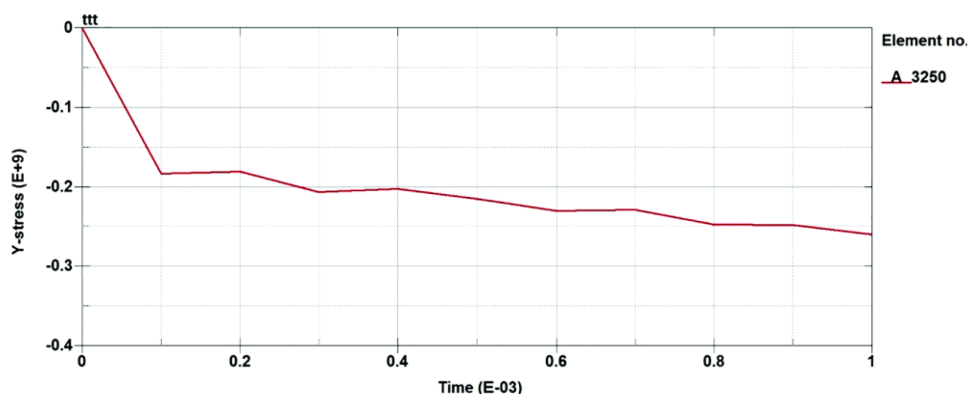


Рис. 4. Изменение во времени кольцевого напряжения в лейнере σ_β (элемент 3250)

Сравнивая согласно методике двух расчетов (см. рис. 1) напряжения $\bar{\sigma}_\beta$ при намотке и напряжения $\sigma_{\beta k}$ при потере устойчивости лейнера, устанавливаем, что в данном случае потери устойчивости лейнера не будет.

Проследим механическое поведение лейнера при намотке на него композитной ленты с большей силой натяжения. Пусть наматывается композитная лента шириной 24 мм из высокопрочного углеродного волокна ($\sigma_\beta = 3,8$ ГПа) с натяжением $T_\phi = T_{90} = 2700$ Н, что соответствует напряжению в 10 % от предельного напряжения σ_β . Расчеты по формуле (1) дают $\bar{\sigma}_\beta = -227$ МПа. Так как в этом варианте намотку выполняем с более высоким натяжением ленты $|\bar{\sigma}_\beta| > |\sigma_\beta|$, то, очевидно, произойдет потеря устойчивости лейнера.

Таким образом, от силы натяжения композитной ленты зависит возможность потери устойчивости лейнера, что несомненно должно учитываться в разрабатываемых технологических процессах изготовления цилиндрических МК БВД.

Заключение. Выполненные расчеты опрессовки алюминиевого лейнера наматываемой многослойной углепластиковой оболочкой показали, что при изготовлении металлокомпозитных баллонов высокого давления, в процессе намотки на лейнер композитной ленты, не исключается возможность потери устойчивости лейнера. Предложенная методика двух расчетов позволяет оценивать допустимое, с точки зрения потери устойчивости лейнера, давление опрессовки металлического лейнера при намотке на него композитной ленты с натяжением. В алгоритме методики применяются современные программные продукты, с помощью которых учитываются геометриче-

ская и физическая нелинейность конструкции лейнер — композитная оболочка, что важно для лейнеров из пластичных материалов, например алюминиевых сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Васильев В.В., Мороз Н.Г. *Композитные баллоны давления. Проектирование, расчет, изготовление и испытания: справ. пособие*. Москва, Машиностроение; Инновационное машиностроение, 2015, 373 с.
- [2] Vasiliev V.V. *Composite pressure vessels — Analysis, design and manufacturing*. Blacksburg, Bull Ridge Publ., 2009, 704 p.
- [3] Трутнев Н.С., Шишкин А.А., Филимонова Т.В. Обоснование выбора конструкции и материала облегченного металлокомпозитного баллона высокого давления для авиационной промышленности. *Научно-технические ведомости СПбГПУ*, 2016, № 6, с. 57–64.
- [4] Молочев В.П. Расчет металлокомпозитного цилиндрического баллона давления. *Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении*, 2010, вып. 4 (159), с. 9–14.
- [5] Асюшкин А.В., Викуленков В.П., Лебедев К.Н., Лукьянец С.В., Мороз Н.Г. Создание высокоэффективного металлокомпозитного баллона высокого давления. *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2015, № 1 (27), с. 19–27.
- [6] 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 лейнером для изделий ракетно-космической техники. *Конструкции из композиционных материалов*, 2015, № 2 (138), с. 15–22.
- [7] Моисеев А.А., Асюшкин В.А., Цвелев В.М., Викуленков В.П., Смердов А.А., Цветков С.В., Кулиш Г.Г. Разработка композитного баллона высокого давления для разгонного блока «Фрегат». *Актуальные вопросы проектирования космических систем и комплексов: сб. науч. тр.* Полищук Г.М., Пичхадзе К.М., ред. Москва, Изд-во «Блок-Информ-Экспресс», 2015, с. 46–52.
- [8] Сарбаев Б.С. *Расчет силовой оболочки композитного баллона давления*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001, 96 с.
- [9] 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.
- [10] Евстратов С.В. *Разработка технологических процессов изготовления сверхлегких комбинированных металлокомпозитных баллонов давления: дис. ... канд. техн. наук*. Москва, МАИ, 2015, 151 с.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.

- [14] 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.*
- [15] Егоров А.В. Устойчивость цилиндрических оболочек в жесткой среде. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 9. DOI 10.18698/2308-6033-2017-9-1670
- [16] Егоров А.В. Конечно-элементный анализ продольно сжатого стержня. *Проблемы машиностроения и автоматизации*, 2018, № 4, с. 114–118.

Статья поступила в редакцию 28.01.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Егоров В.Н., Егоров А.В. Оценка допустимого давления опрессовки металлического лайнера при намотке композитной оболочки. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-2-1854>

Егоров Виталий Николаевич — д-р техн. наук, профессор, директор по науке — ученый секретарь института, ОАО НИАТ.

Егоров Антон Витальевич — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана. SPIN-код 7513-3026. e-mail: antegor177@mail.ru

Estimation of the allowable pressure of metal liner pressure testing when winding a composite shell

© V.N. Egorov¹, A.V. Egorov²

¹Joint Stock Company “National Institute of Aviation Technologies”,
Moscow, 117587, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

We investigated a liner local buckling as a result of delamination, which can occur at various stages of production, including the cases when the composite tape is wound with tension on the liner. To solve the problem of estimating the allowable pressure of the liner pressure test, a method of two calculations is proposed, the technique is focused on the use of temperature analogy. The method implements the closure of solutions to the contact pressure and stability of the liner through a common parameter which is the hoop stress in the liner in stressed state zone, this state is close to homogeneous. The contact pressure of the multi-ply composite shell on the liner is determined by the value of the specified tension of the composite tape wound. The liner stability calculation was carried out in the LS-DYNA software package in a dynamic formulation when specifying the cooling of the outer shell. Delamination computing for the middle part of a cylindrical metal composite high-pressure vessel was performed. We show both variants: (i) with the liner peeling from the composite shell and (ii) without delamination.

Keywords: metal composite cylinder, liner buckling, liner proof-test pressure, delamination of metal composite cylinder, deflected mode, straining model

REFERENCES

- [1] 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.
- [2] Vasiliev V.V. *Composite pressure vessels — Analysis, design and manufacturing*. Blacksburg, Bull Ridge Publ., 2009, 704 p.
- [3] Trutnev N.S., Shishkin A.A., Filimonova T.V. Rational for selection design and material of metal-lite high pressure cylinders for the aircraft industry. *Naukoemkie tekhnologii — Science Intensive Technologies*, 2016, vol. 17, no. 6, pp. 63–67.
- [4] Molochev V.P. Raschet metallokompozitnogo tsilindricheskogo ballona davleniya [Calculation of metal-base composite cylindrical high pressure vessel]. *Voprosy Oboronnoy tekhniki. Ser. 15. Kompozitnye nemetallicheskie materialy v mashinostroenii — Problems of Defense Technology. Ser. 15. Composite Non-Metallic Materials in Mechanical Engineering*, 2010, issue 4 (159), pp. 9–14.
- [5] Asyushkin V.A., Vikulenkov V.P., Lebedev K.N., Lukyanets S.V., Moroz N.G. Sozdaniye vysokoeffektivnogo metallokompozitnogo ballona vysokogo davleniya [Development of higheffective metal-base composite high-pressure vessel]. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina (Herald of Lavochkin Association)*, 2015, no. 1 (27), pp. 19–27.
- [6] 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 cylin-

- ders 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.
- [7] Moisehev A.A., Asyushkin V.A., Tsvelev V.M., Vikulenko V.P., Smerdov An.A., Tsvetkov S.V., Kulish G.G. Development of a composite high pressure vessel for FREGAT-SBU versatile upper stage. In: *Aktualnyye voprosy proyektirovaniya kosmicheskikh sistem i kompleksov: sb. nauch. tr.* [Actual issues of designing space systems and complexes: Collect. scientific works]. Polischuk G.M., Pichkhadze K.M., eds. Moscow, Block-Info-Express Publ., 2015, pp. 46–52.
- [8] Sarbaev B.S. *Raschet silovoy obolochki kompozitnogo ballona davleniya* [Calculation of the structural shell of the composite pressure vessel]. Moscow, BMSTU Press, 2001, 96 p.
- [9] Vorobey V.V., Evstratov S.V. Novyye napravleniya v sovremennoy tekhnologii namotki konstruktsiy iz kompozitsionnykh materialov [New trends in technology for winding of composite material construction]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta — Aerospace MAI Journal*, 2009, vol. 16, no. 1, pp. 61–72.
- [10] Evstratov S.V. *Razrabotka tekhnologicheskikh protsessov izgotovleniya sverkhlegkikh kombinirovannykh metallokompozitnykh ballonov davleniya: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of technological processes for the manufacture of ultra-light combined metal composite pressure vessels: Diss. ... Cand. Sc. in Engineering]. Moscow, MAI, 2015, 151 p.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Egorov A.V. Ustoychivost tsilindricheskikh obolochek v zhestkoy srede [Buckling of cylindrical shells in rigid medium]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, issue 9. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-9-1670
- [16] Egorov A.V. Finite-element analysis of a column strut. *Problemy mashinostroyeniya i avtomatizatsii — Engineering And Automation Problems*, 2018, no. 4, pp. 114–118.

Egorov V.N., Dr. Sc. (Engineering), Professor, Director for Science — Scientific Secretary of the Institute, Joint Stock Company “National Institute of Aviation Technologies”.

Egorov A.V., Cand. Sc. (Engineering), Assoc. Professor, Bauman Moscow State Technical University. SPIN-code 7513-3026. e-mail: antegor177@mail.ru