

УДК 629.7.018.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕСУРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНЫХ БАЛЛОНОВ

И.К. ЛЕБЕДЕВ, К.Н. ЛЕБЕДЕВ, Н.Г. МОРОЗ

Рассматриваются экспериментально-теоретические методы исследования ресурсных характеристик металлокомпозитных баллонов высокого давления. Показывается, что жесткость силовой композитной оболочки существенно влияет на ресурс баллонов. Приводятся экспериментальные результаты и их сопоставление с данными теоретических расчетов.

Ключевые слова: ресурс, усталостные испытания.

Традиционное стремление к снижению веса авиаконструкций и борьба за повышение энерговооруженности заставляют все шире использовать легкие и прочные металлокомпозитные баллоны высокого давления в системах управления и жизнеобеспечения воздушных судов гражданской и военной авиации и космических аппаратов.

По решению Международной организации гражданской авиации (ИКАО) с 3 ноября 1998 г. все авиалайнеры обязаны быть снабжены кислородными дыхательными системами. Авиалайнер должен иметь 4-5 двадцатилитровых баллонов для снабжения пассажиров кислородом в случае разгерметизации судна и 20 единиц двухлитровых (давление 210 ат) для индивидуального использования. Эксплуатируемые на сегодняшний день двухлитровые стальные баллоны при тестовых испытаниях на прострел (в соответствии с международными стандартами) взрываются. Композитные баллоны взрывобезопасны и при разрушении не образуют осколков.

Кроме этого более 2000 баллонов в год требуется федеральной авиационной службе России для оснащения 600 авиационных аварийно-спасательных групп, которые по требованиям ИКАО находятся на постоянном дежурстве для обеспечения международных полетов через территорию России.

В качестве объекта исследований рассмотрены металлокомпозитные баллоны с тонким сварным стальным герметизирующим лейнером и силовой оболочкой (СО) на основе угольных волокон и эпоксидного связующего [1].

Историю развития газовых баллонов можно разбить на следующие этапы: 1) металлические; 2) металлические с подмоткой стеклопластиком; 3) композитные с композитным или полимерным лейнером; 4) металлокомпозитные с тонкими металлическими (титановые или алюминевые сплавы, или нержавеющая сталь) лейнерами и силовой оболочкой (СО) из композиционных материалов (КМ).

Металлокомпозитные баллоны (МКБ) легче стальных в 4-6 раз, титановых в 1,5-2 раза, обладают взрывобезопасностью, безосколочным разрушением, высокой коррозионостойкостью.

Надо признать, что Россия отстает как в уровне характеристик материалов, так и в технологическом оснащении производства емкостей и баллонов из КМ.

В настоящее время в мире существуют два наиболее крупных специализированных производителя топливных баков и баллонов давления из композиционных материалов.

1. Pressure Systems Inc (PSI), входящая в структуру ATK Space Systems Inc, является ведущим поставщиком МКБ для аэрокосмической отрасли США.

2. Astrium Space Transportation GmbH (Bremen German) является ведущим поставщиком топливных баков и баллонов давления в Евросоюзе.

В табл. 1 приведены характеристики МКБ, созданных в ATK Space Systems Inc.

Таблица 1

Тип баллона	Тип лейнера	Объем V, л	Давление разрушения P, бар	Вес G, кг	Вес лейнера, кг	Эффективность PV/G, км
Цилиндрический (углепластик)	Титан 6AL-4V	87	620	23	4,3	23,45
Цилиндрический (углепластик)	Титан 6AL-4V	67,3	572	11,7	3,7	32,9

В табл. 2 приведены характеристики МКБ, созданных в Astrium Space Transportation.

Таблица 2

Эффективность, PV/G, км	Объем, л	Конструкция	Лейнер	Рабочее давление, бар
30 - 32	18	Сфера	Титан	250
	35	Сфера	Титан	280
	51	Сфера	Титан	280
	68	Цилиндр	Титан	150 Хе
	68	Цилиндр	Титан	310 Хе
	70	Цилиндр	Титан	190 Хе
	80	Цилиндр	Титан	310 Хе
	89,5	Цилиндр	Титан	310 Хе

В России в настоящее время практически отсутствуют производители высококачественных конструкций такого рода, какие создаются в вышеприведенных фирмах. В табл. 3 приведены параметры МКБ, созданных отечественными производителями.

Таблица 3

Тип баллона	Тип лейнера	Объем V, л	Давление разрушения P, бар	Вес G, кг	Эффективность PV/G, км
Шар титановый, Южмаш	Титан 6Al-4V	23,6	780	11,5	16
Шар композитный (стеклопластик), Котлас	Нержавеющая сталь	25	728	21,5	8,5
Цилиндр композитный (стеклопластик), Котлас	Нержавеющая сталь	20	315	15,8	4
Цилиндр композитный (органопластик), Хруничев	Алюминий	36	820	12	24,6
Цилиндр композитный (органопластик + углепластик), "НИИМАШ" Салда	Титан	38	220	10,5	5,62

Из сопоставления данных табл. 1-3 видно, что эффективность отечественных производителей значительно ниже основных зарубежных конкурентов.

Теоретические исследования и опыт изготовления МКБ показали, что наибольший весовой эффект достигается при тонком металлическом лейнере и жесткой СО из высокомодульного КМ. Существуют различные технологии изготовления тонкостенных металлических лейнеров: раскатка, порошковая металлургия, газовая формовка с использованием эффекта сверхпластичности, сварка трением и др. Все эти технологии сложны и дорогостоящи. Наиболее простым и дешевым способом представляется сварка заготовок, полученных методом пластического деформирования листовых заготовок.

Однако применительно к сварке особо тонкостенных без специальной подготовки деталей не представляется возможным осуществлять качественное оплавление стыкуемых торцов в силу соизмеримости параметров шероховатости и разнотолщинности стыкуемых торцов с их толщиной. Это обусловлено тем, что при стыковой сварке оплавлением вследствие случайного характера образования контактных перемычек по стыкуемым торцам под действием протекающего по контактным перемычкам сварочного тока происходят быстрый перегрев металла перемычек и выброс его из зоны сварки. Кроме того, ввиду специфических особенностей нагрева металла при

непрерывном оплавлении не удастся получить достаточно широкую зону разогрева, необходимую для качественной сварки изделий с большими сечениями. Известно также и то, что при выполнении сварки особо тонкостенных изделий с большими поперечными сечениями происходит неодинаковое изменение периметров свариваемых заготовок вследствие температурно-силовых деформаций, возникающих в материале свариваемых заготовок при реализации процесса сварки. Данные изменения длин периметров приводят в лучшем случае к короблению свариваемых заготовок или к их прожиганию. Для качественной реализации способа сварки тонкостенных оболочек необходимо обеспечить полное совпадение стыкуемых кромок изделий как по толщине, так и по периметру с соблюдением соосности и точности центрирования свариваемых деталей и поддерживать такое состояние в самом процессе сварки. Это можно обеспечить только путем полной автоматизации технологического процесса с применением специального оборудования с программным управлением и с использованием синергетических программ, что позволит получить оптимальные значения всех характеристик сварки и конструкции в целом.

Такая технология была разработана и внедрена в ЗАО "САФИТ". Для ее реализации созданы робототехнические комплексы для высокоточного позиционирования (до 0,03 мм) стыкуемых кромок по толщине и периметру с обеспечением соосности и центрируемости свариваемых заготовок, разработана технология микроплазменной сварки особотонкостенных (до 0,3 мм) обечаек с большим поперечным сечением. Создано оборудование для намотки и термообработки силовой композитной оболочки и испытаний МКБ.

Разработанная технология обладает широкой универсальностью. С ее использованием могут быть изготовлены и баллоны для сжиженного природного газа (СПГ) (рис. 1), и для компримированного природного газа (КПГ) (рис. 2), и для МКБ небольших объемов (0,2-50 л), и для заправочных емкостей большого объема.

ЗАО "САФИТ" разработаны и изготовлены металлокомпозитные емкости объемом от 0,25 л до 70 л и рабочим давлением от 1,6 МПа до 70,0 МПа и опытный лабораторный образец оборудования для их изготовления. Основные параметры некоторых из них представлены в табл. 4.

Таблица 4

Тип баллона	Тип лайнера	Объем V, л	Давление разрушения P, бар	Вес G, кг	Эффективность PV/G, км
Цилиндр композитный	Нержавеющая сталь	4,0	300	1,5	30,66
Шар композитный	Нержавеющая сталь	6	300	1,6	28,9
Цилиндр композитный	Нержавеющая сталь	6,8	300	3,2	23,5
Шар композитный	Нержавеющая сталь	8,0	250	2,2	28,4
Шар композитный	Нержавеющая сталь	12,0	300	3,1	30,2
Шар композитный	Нержавеющая сталь	19,0	300	4,5	33,0
Шар композитный	Нержавеющая сталь	25,2	340	5,6	37,7
Цилиндр композитный	Нержавеющая сталь	50	250	10,5	32,4
Цилиндр композитный	Нержавеющая сталь	40	300	11,1	27
Цилиндр композитный	Нержавеющая сталь	70	300	12,8	36,0

Наличие металлического лайнера в конструкции баллона требует решения задачи оптимального соотношения толщин металла и композита, выбора схемы армирования и построения соответствующей формы баллона. При этом одновременно ставится несколько связанных между собой задач оптимизации конструкции.

Основную из них сформулируем следующим образом: при известной конструкции лайнера баллона требуется найти такую структуру распределения армирующего материала, которая обеспечила бы минимальный вес конструкции баллона при заданной нагрузке баллона внутренним давлением. В качестве ограничения при рассмотрении этой задачи ставится условие: требуется найти такую геометрию баллона, при которой возникающие при нагрузке баллона внутренним давлением деформации (интенсивность деформаций) в материале лайнера были

одинаковы по всей поверхности, и уровень допустимых пластических деформаций, возникающих при действии циклического испытательного давления, не превышал заданной величины.

Результатами многочисленных исследований [2; 3] показано, что металл сварного соединения при наиболее оптимальной технологии сварки имеет предел усталости не выше 80% от предела усталости основного металла, причем снижение предела выносливости идет в основном за счет внутренних структурных дефектов сварного шва. При малоциклового усталости при числе циклов до 10^4 разрушающие амплитуды деформаций для сварного соединения составляют порядок 50-65% от разрушающих амплитуд основного металла. То есть допустимый размах пластической деформации для высокопластичных сталей – 0,2-0,4%, а для пластичных алюминиевых сплавов – 0,05-0,15%.

С позиций малоциклового усталости и коррозионной трещиностойкости металлических лейнеров наиболее эффективными являются тонкостенные листовые нержавеющие стали аустенитного класса [3]. При общей деформации, возникающей в материале лейнера, до уровня 0,56% малоциклового усталости данного сплава в 5,5 раз выше, чем малоциклового усталости алюминиевых сплавов, в 1,95 раза выше титановых сплавов и определяется уровнем $(3,5-6) \cdot 10^4$ циклов.

Все конструктивно-технологические решения прошли тщательную экспериментальную проверку. В табл. 5 приведены результаты испытаний МКБ объемом 25,2 л. Исследовалась зависимость числа циклов нагружения до появления трещин от величины размаха пластических деформаций, определяемая жесткостью (схемой армирования) силовой оболочки. Как показали расчеты, зависимость удовлетворительно описывается уравнением Коффина-Менсона для малоциклового усталости. Достаточно хорошее совпадение эксперимента и расчета свидетельствует о высоком качестве МКБ и хорошей повторяемости реализации технологических операций, обеспечивающихся автоматизацией процесса.

В табл. 5 приведены результаты испытаний МКБ объемом 25,2 л трех видов, отличающихся схемой армирования (жесткостью) силовой оболочки, а следовательно, и размахом пластической деформации в материале. Все образцы МКБ нагружались пробным давлением $P_0 = 1,25 \cdot P_{\text{раб.}} = 425$ бар, и определялась фактическая негерметичность при рабочем давлении $P_{\text{раб.}} = 340$ бар. Затем на части образцов проводились испытания по определению фактического ресурса, другая часть предварительно подвергалась циклическому нагружению 25 циклов с $0 \div P_{\text{раб.}}$ и разрушающим испытаниям внутренним давлением. Показано, что ресурс МКБ (число циклов нагружения до потери герметичности, т.е. появления трещин) существенно зависит, как следует из критерия Коффина-Менсона, от жесткости СО (размаха пластических деформаций). Следует также отметить, что и величина исходной негерметичности существенно зависит от размаха пластических деформаций (жесткости СО).

Как видно из табл. 4, 5, несмотря на несовершенство лабораторной установки, ограниченность габаритных размеров заготовок, изготовленные на ней МК емкости имеют весовую эффективность, превышающую и отечественные, и зарубежные аналоги. Кроме того, на этой установке удалось апробировать основные принципы предлагаемой технологии, что позволило внедрить эти разработки во многих отраслях:

- с 2009 г. успешно эксплуатируются в МЧС МКБ 6,8 л;
- завершена экспериментальная отработка МКБ с рабочим давлением 340 бар объемами 0,75 л; 4,0 л; 6,0 л и 25,2 л для космических аппаратов;
- создан баллон 49,7 л с рабочим давлением 250 бар для Автоваза;
- сертифицированы баллоны 24,5 л для сжиженного природного газа на рабочее давление 16 бар.

Таблица 5

Номер образца	Схема армирования силовой оболочки	Предыстория нагружения		Масса, кг · 10 ⁻³	Число циклов нагружения 0 - 340 бар до потери герметичности	Экспериментальное давление разрушения, бар	Расчетный ресурс, циклов	Расчет давления разрушения, бар	Величина негерметичности, л мкм рт.ст/с
		P ₀ = 1,25 P _{раб}	25 циклов 0 ÷ P _{раб}						
01-01	2080; 1079; 1706	+	-	5640	122	-	143	720	1,3 ÷ 1,6 · 10 ⁻⁴
01-02		+	-	5660	121	-			
01-03		+	-	5530	134	-			
01-04		+	-	5520	120	-			
01-05		+	-	5570	113	-			
01-06		+	-	5655	123	-			
01-07		+	+	5612	-	764			
01-08		+	+	5590	-	762			
01-09		+	+	5607	-	698			
02-01	1952 + 526; 1079; 1706	+	-	5981	254		230	760	2,1 · 10 ⁻⁴
02-02		+	-	5976	204				
02-03		+	-	5981	281				
02-04		+	+	5970	-	737			
02-05		+	+	6003	-	767			
03-01	2368; 1079; 1706	+	-	6119	411		440	782	5,7 ÷ 7,3 · 10 ⁻⁵
03-02		+	-	5980	397				
03-03		+	-	5830	312				
03-04		+	-	5992	487				
03-05		+	-	6000	442				
03-06		+	+	6048	-	770			
03-07		+	+	5916	-	779			
03-08		+	-	6010	538				
03-09		+	-	6050	693				
03-10		+	-	6096	772				

В заключение следует отметить, что в настоящее время в авиации наметилась тенденция повышения энерговооруженности бортовых систем. Фирмы Боинг и Аэрбас уже сейчас переводят бортовое обеспечение с давления 210 бар на 300 бар. Такой переход невозможен без широкого внедрения МКБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев И.К. Высокопрочные облегченные баллоны высокого давления для систем управления и жизне-способности гражданской авиации // *Научный Вестник МГТУ ГА*. 2008. № 134. С. 76-80.
2. Давыдов С.Н., Козлова Т.В. Малоцикловая коррозионно-усталостная долговечность сварных швов тонколистовой стали 12Х18Н10Т, полученных при различных режимах микроплазменной сварки / *Сб. научных статей*. Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2002. С. 68-71.
3. Бутушин С.В., Никонов В.В., Фейгенбаум Ю.М., Шапкин В.С. *Обеспечение летной годности воздушных судов гражданской авиации по условиям прочности*. М.: МГТУ ГА, 2013. 772 с.

EXPERIMENTAL STUDIES OF LIFE CHARACTERISTICS OF METAL-COMPOSITE CYLINDERS

Lebedev I.K., Lebedev K.N., Moroz N.G.

Experimental and theoretical methods of studying life characteristics of metal-composite high-pressure cylinders are considered. It is shown that the stiffness of a load-bearing composite shell has a considerable effect on service life of the cylinders. Experimental results and their comparison with data of theoretical calculations are presented.

Keywords: service life, tests.

REFERENCES

1. **Lebedev I.K.** Vysokoprochnye oblegchennye ballony vysokogo davlenija dlja sistem upravlenija i zhiznesposobnosti grazhdanskoj aviacii. *Nauchnij Vestnik MGTU GA*. 2008. № 134. Pp. 76-80. (In Russian).
2. **Davihdov S.N., Kozlova (Churilova) T.V.** Malociklovaja korrozionno-ustalostnaja dolgovechnost' svarnyh shvov tonkolistovoj stali 12H18N10T, poluchennyh pri razlichnyh rezhimah mikroplazmennoj svarki. *Sb. nauchnikh statej*. Ufa: Ufimskij gosudarstvennij neftyanoj tekhnicheskij universitet. 2002. Pp. 68-71. (In Russian).
3. **Bututhin S.V., Nikonov V.V., Feyjgenbaum Yu.M., Shapkin V.S.** *Obespechenie letnoj godnosti podushnikh sudov grazhdanskoj aviacii po usloviyam prochnosti*. M.: MGTU GA. 2013. 772 p. (In Russian).

Сведения об авторах

Лебедев Игорь Константинович, 1972 г.р., окончил МАТИ (1994), кандидат технических наук, директор ЗАО "САФИТ", автор более 20 научных работ, область научных интересов – механика конструкций из композиционных материалов.

Лебедев Константин Нитович, 1946 г.р., окончил МАИ (1970), профессор, доктор технических наук, заместитель начальника "Центра прочности" ОАО "ЦНИИСМ", автор более 100 научных работ, область научных интересов – механика конструкций из композиционных материалов.

Мороз Николай Григорьевич, 1947 г.р., окончил ХАИ (1970), кандидат технических наук, главный конструктор ЗАО "САФИТ", автор более 60 научных работ, область научных интересов – механика конструкций из композиционных материалов.