

678.067:621.763 (075.8)

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ТОРОВЫХ БАЛЛОНОВ ДЛЯ ДЫХАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Асп. Н. Т. ЧАН, д-р техн. наук, проф. М.А. КОМКОВ

Рассматривается конструкция торового баллона с двухслойной стеклопластиковой силовой оболочкой (СО), вкладным резиновым лейнером и одним заправочным штуцером. Представлен технологический процесс, по которому СО торового сосуда наматывается за две операции. Сначала на многоразовых металлических оправках на намоточном станке токарного типа изготавливаются элементы внутреннего продольного слоя СО, а после отверждения и сборки элементов продольного слоя с оболочкой-лейнером, на него, как на неудаляемую оправку, на торонамоточном станке наматывается поперечный слой СО.

The construction of a torus tube with two-layer fiberglass power winding (PW), supplementary rubber liner and one refueling pipe is examined. Technological process on which PW of a torus bulb is being reeled up by two operations is presented. At first using coiling machine with non-expendable metal braids longitudinal fiber elements of PW are made, then after cure and setting of elements of a longitudinal layer on an environment liner, the cross-section layer of PW is reeled up on it as on indestructible braid of a coiling machine.

Ранее в [1] нами были изложены метод проектирования и последовательность расчета конструктивно-технологических параметров композитных торовых оболочек с продольно-поперечной схемой армирования. Стеклопластиковые торовые баллоны, изготовленные одновременной намоткой продольных и поперечных слоев, при испытаниях на внутренне давление показали удовлетворительную работоспособность (табл. 1), а напряженно-деформированное состояние силовой оболочки соответствовало расчетным значениям.

Таблица 1

Результаты испытаний стеклопластиковых торовых баллонов с резиновыми герметиками

$D_6 / d_{\text{сеч}},$ мм	Объем оболочки, $V_{\text{об}}, \text{дм}^3$	Количество баллонов, шт.	Разрушающее давление, $P_{\text{раз}}, \text{МПа}$	Масса силовой оболочки, $M_{\text{со}}, \text{кг}$	Масса баллона, $M_6, \text{кг}$	$W_{\text{со}}^*, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
404/85	5,4	3	4,5-5,2	0,17	0,627	142-165
		1	9,8	0,34	0,787	156

Примечание: $W_{\text{со}}^* = \frac{P_{\text{раз}} V_{\text{об}}}{M_{\text{со}}}$ — параметр конструктивного совершенства стеклопластиковой оболочки.

Однако технологический процесс изготовления композитных торов спиральной и одновременной продольно-поперечной намоткой (с применением одноразовых песчано-полимерных оправок) [2] является весьма трудоемким и может быть рекомендован только для единичного либо мелкосерийного производства.

С целью повышения технологичности конструкции и сокращения цикла изготовления композитных торовых баллонов в условиях серийного производства предлагаются следующие изменения в конструкции баллона и технологическом процессе его изготовления.

1. Конструкция торового баллона включает в себя герметизирующую оболочку-лейнер, двухслойную композитную силовую оболочку и один узел штуцера (рис. 1). 2. Применение в конструкции баллона эластичной герметизирующей оболочки-лейнера (резина, полимер) обеспечит полную реализацию прочности однонаправленного КМ, например стеклопластика. 3. Композитная силовая оболочка состоит из двух слоев: продольного и поперечного. 4. Узел штуцера, находящийся в области центрального отверстия баллона, обеспечивает удобное расположение редуктора давления в дыхательных аппаратах при применении баллона.

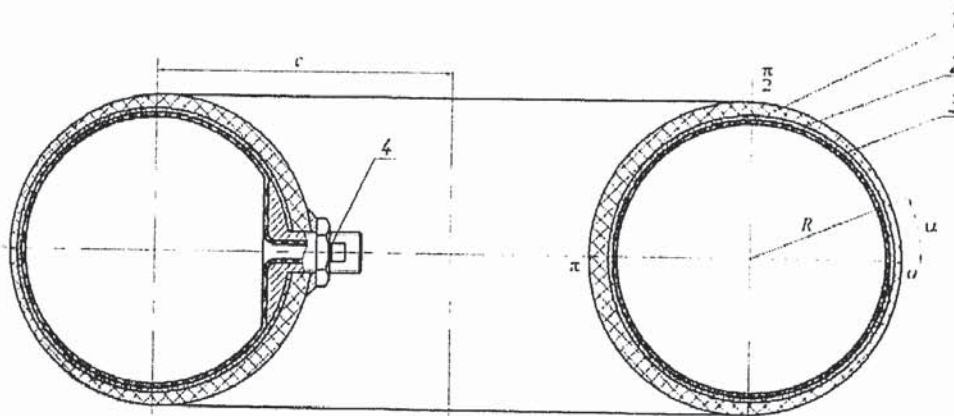


Рис 1. Предлагаемая конструкция композитного торового баллона с продольно-поперечной схемой армирования силовой оболочки: 1 — поперечный слой из ОКМ, 2 — продольный слой из ОКМ, 3 — резиновая оболочка, 4 — узел штуцера

Предлагаемая технология изготовления стеклопластиковой торовой оболочки включает две разделенные во времени намоточные операции. Сначала открытой намоткой на намоточном станке токарного типа изготавливают элементы внутреннего продольного слоя СО, а после отверждения связующего и сборки продольных слоев с герметизирующей оболочкой, на них, как на неудаляемую оправку, на торонамоточном станке наматывают поперечный слой СО торового баллона.

Внутренний продольный слой силовой оболочки состоит из четырех элементов, разделенных по углам α_{r1} , α_{r2} : периферийного, внутреннего и двух боковых элементов (рис. 2). Периферийный и внутренний элементы с небольшим проскальзыванием наматываются на разборные многоразовые металлические оправки. Изготовление боковых элементов выполняют за две операции. Сначала открытой намоткой на намоточном станке токарного типа изготавливают профильную дисковую заготовку, затем она кладется в пресс-форму. После отверждения связующего получают элементы продольного слоя. Выполнив сборку продольных элементов с вкладной герметизирующей оболочкой, на такой продольный слой, как на неудаляемую оправку, на торонамоточном станке СНТ-2А [2] наматывают поперечный слой силовой оболочки. После намотки поперечного слоя штуцер изнутри оболочки вытягивают и окончательно собирают со слоями оболочки. Выполнив окончательную термообработку связующего получают готовый торовый баллон. Новая схема процесса изготовления стеклопластиковых торовых баллонов намоткой представлена на рис. 3.

Чтобы получить постоянную толщину бокового элемента продольного слоя h_2 , толщину профильной заготовки определяют по формуле:

$$\delta(\alpha) = \sqrt{(R_{\text{опр}} + h_2)^2 - (r - c)^2} - \sqrt{R_{\text{опр}}^2 - (r - c)^2}, \quad (1)$$

где $R_{\text{опр}}$ — радиус оправки; c — расстояния от оси до вершины оболочки; $r = r(\alpha) = c + R_{\text{опр}} \cos \alpha$ — текущий радиус вращения.

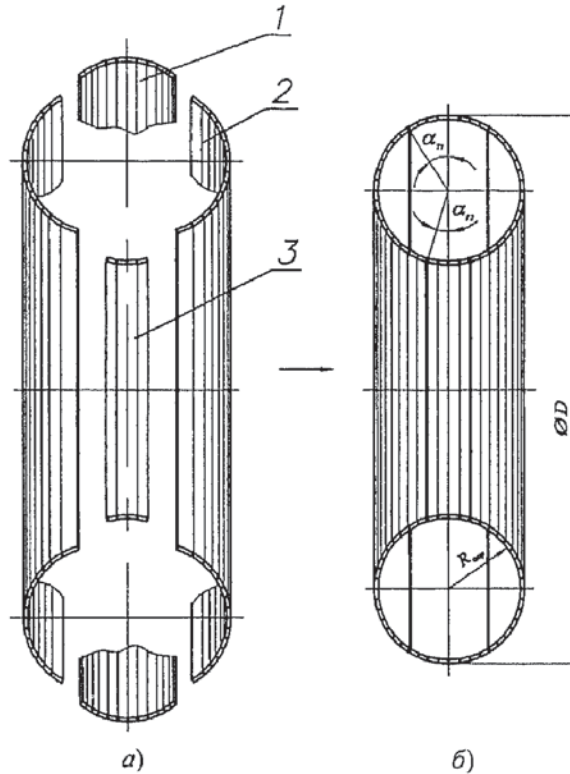


Рис 2. *а* — элементы продольного слоя: 1 — периферийный элемент, 2 — боковой элемент, 3 — внутренний элемент; *б* — готовый продольный слой силовой торовой оболочки

Для того, чтобы обеспечить высокую производительность, упростить технологический процесс изготовления, а также получить легкий баллон, необходимо рационально выбирать ширину наматываемой ленты. Если лента препрега укладывается с натяжением всех нитей вдоль широты оболочки α (рис. 5), то ее ширина $t_n(\alpha)$ при одинаковой относительной разности в длине крайних витков $\bar{\Delta}l$, определяется по формуле:

$$\tau(\alpha) = \frac{t(\alpha)}{2R_{\text{опр}}} = \frac{1}{2} \arccos \left[(1 - \bar{\Delta}l) \cos(\alpha) - a_{\text{опр}} \bar{\Delta}l \right] - \frac{1}{2} \alpha, \quad (2)$$

где $\tau(\alpha)$ — относительная ширина наматываемой ленты, $a_{\text{опр}} = c / R_{\text{опр}}$ — геометрический параметр торовой оправки, а угловая координата α меняется в пределах: $0 \leq \alpha \leq \pi - 2\tau$. Анализ выражения (2) показывает, что $\tau(\alpha)$ достигает своего минимального значения при $\alpha = \alpha_{\text{мин}}$. Значения угла $\alpha_{\text{мин}}$ находим из выражения:

$$\frac{(1 - \bar{\Delta}l)^2 + a_{\text{опр}}^2 \bar{\Delta}l^2 - 1}{2a_{\text{опр}} \bar{\Delta}l(1 - \bar{\Delta}l)} = \cos \alpha_{\text{мин}}. \quad (3)$$

Процесс изготовления торового баллона будет более простым, если продольный слой, состоящий из отдельных элементов, наматывается лентой с постоянной шириной.

Допустимую относительную ширину ленты для намотки периферийного и внутреннего элементов выбираем согласно выражению (2). Изменение $\tau(\alpha)$ от угла α

показано на рис. 5. При этом лента своей плоскостью уложена на поверхность оправки. Если профильная заготовка бокового элемента наматывается лентами, ширина которых идеально соответствует толщине профильной заготовки $\delta(\alpha)$, то лента в процесс переформовки укладывается к поверхности оправки на ребро под углом $\pi/2 - \alpha$, поэтому эквивалентная ее ширина для боковых элементов продольного слоя (рис. 4) определяется по формуле:

$$t_n^{\text{ЭКВ}}(\alpha) = \frac{h_n}{\sin \alpha}, \quad (4)$$

где h_n — толщина ленты; $\alpha_{T1} \leq \alpha \leq \pi - \alpha_{T2}$, а углы α_{T1} и α_{T2} выбирают, исходя из возможности намотки периферийного и внутреннего элементов без большого проскальзывания.

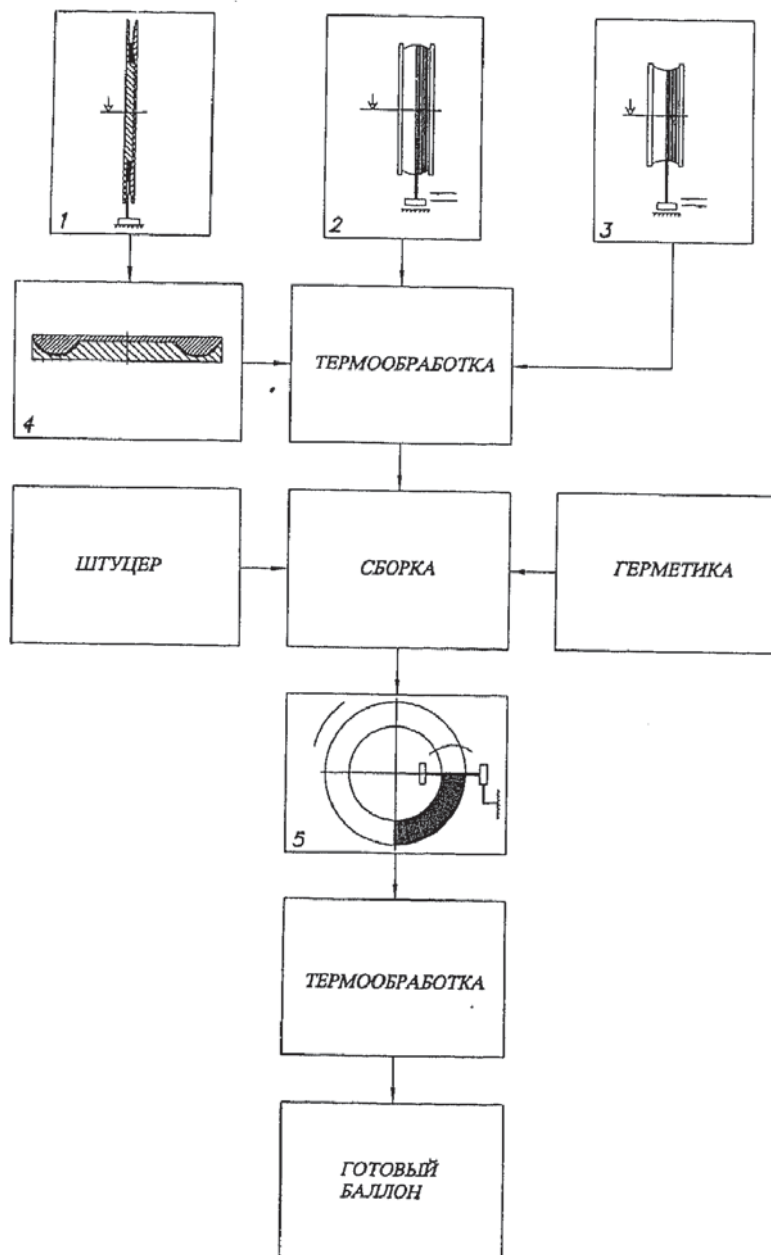


Рис 3. Схема изготовления стеклопластиковых торовых баллонов с продольно-поперечной схемой армирования силовой оболочки в условиях серийного производства: 1 — намотка дисковой профильной заготовки; 2 — намотка периферийного элемента; 3 — намотка внутреннего элемента; 4 — выкладка боковых элементов; 5 — намотка поперечного слоя на СНТ-2А

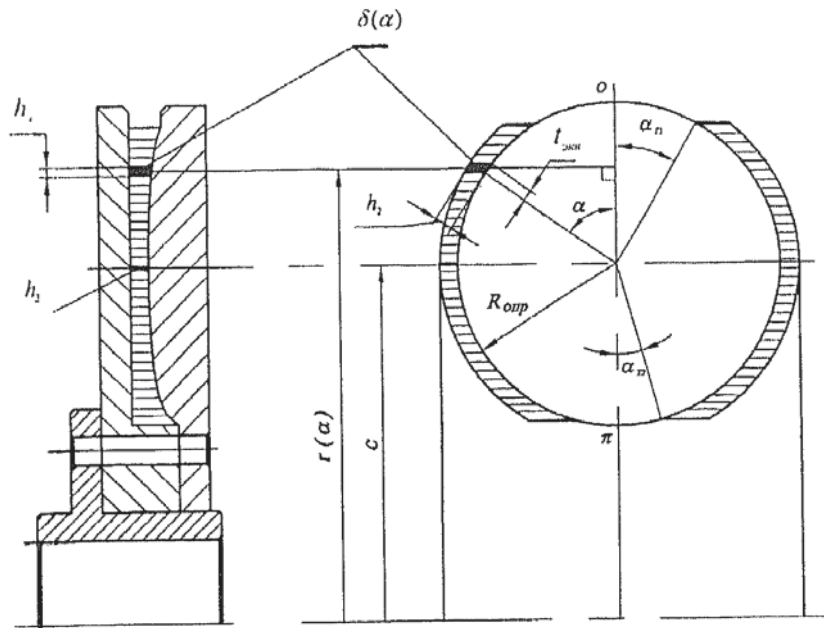


Рис 4. Схема оправки для намотки профильной заготовки боковых элементов

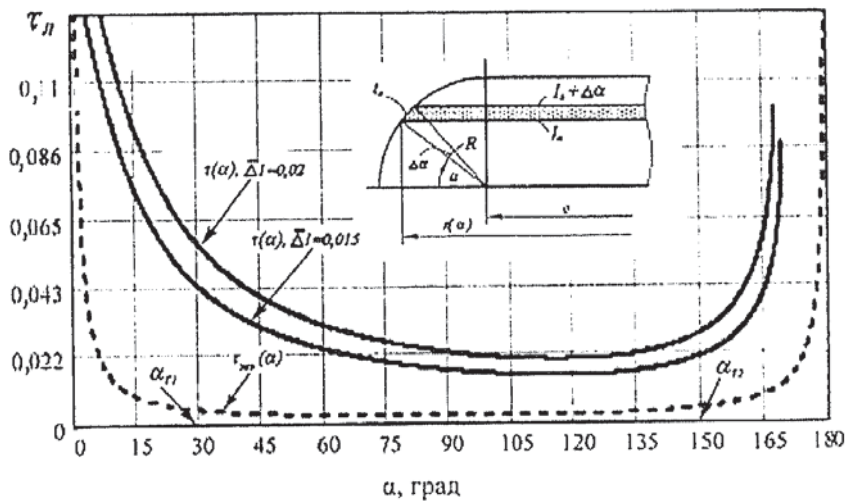


Рис 5. Изменение относительной ширины ленты вдоль широты α :
 $R_{\text{opp}} = 61 \text{ мм}, a_{\text{opp}} = 2,198, h_n = 0,263, \bar{\Delta}l = 1,5\%, \bar{\Delta}l = 2\%, \alpha_{\text{min}} = 116^\circ$ и $\alpha_{\text{min}} = 115^\circ$

Допустим, что эквивалентность будет достигнута при изготовлении боковых элементов выкладкой профильной заготовки в пресс-форме. Тогда относительная ширина ленты для боковых элементов продольного слоя составит:

$$\tau_{\text{эkv}}(\alpha) = \frac{h_n}{2R_{\text{opp}} \sin \alpha}. \quad (5)$$

Так как толщина наматываемой ленты значительно меньше ее ширины, то значение $\tau_{\text{эkv}}(\alpha)$ на участке $\alpha_{\gamma_1} \leq \alpha \leq \pi - \alpha_{\gamma_2}$ будет всегда меньше относительной ширины ленты $\tau(\alpha)$, укладываемой на плоскость. Зависимости $\tau(\alpha)$ и $\tau_{\text{эkv}}(\alpha)$ от α , построенные по выражениям (2) и (5) для заданной относительной разности в длинах крайних витков этих лент, показаны на рис. 5.

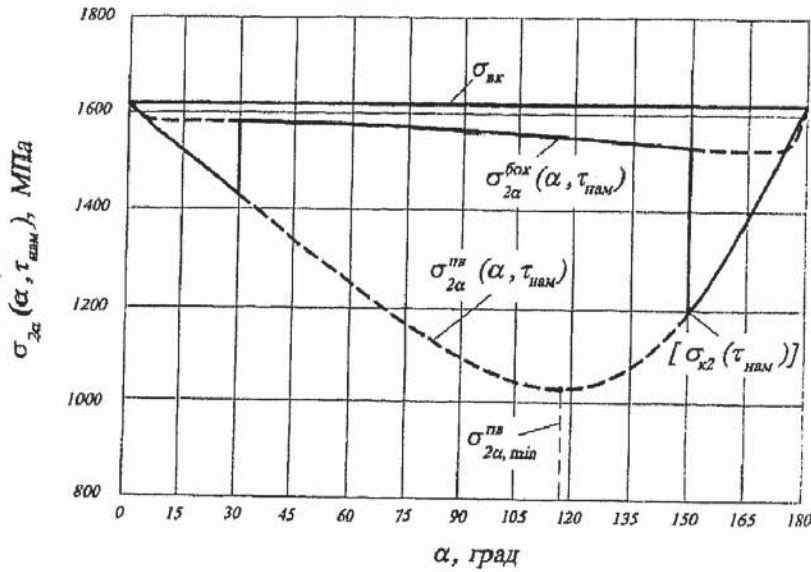


Рис 6. Расчетные реализуемые напряжения однонаправленного КМ в элементах продольного слоя:

$$R_{\text{опр}} = 61 \text{ мм}, a_{\text{опр}} = 2,198, \tau_{\text{нам}} = 0,021, \sigma_{\text{вк}} = 1620 \text{ МПа}, E_{\text{к}} = 55 \text{ ГПа}, \alpha_{\text{мин}} = 116^\circ$$

Для относительной ширины наматываемой ленты $\tau(\alpha) = \tau_{\text{нам}}$ реализуемое напряжение в периферийном и внутреннем элементах продольного слоя определяется из выражения (20) [1]:

$$\sigma_{2\alpha}^{\text{пв}}(\alpha, \tau_{\text{нам}}) = \sigma_{\text{вк}} - \frac{\cos \alpha + [\sin \alpha - \sin(\alpha + 2\tau_{\text{нам}})] / 2\tau_{\text{нам}}}{a_{\text{опр}} + \cos(\alpha + 2\tau_{\text{нам}})} E_{\text{к}}, \quad (6)$$

где $0 \leq \alpha \leq \alpha_{T1}$ и $\pi - \alpha_{T2} \leq \alpha \leq \pi$, $E_{\text{к}}$ — модуль упругости однонаправленного КМ, $\sigma_{\text{вк}}$ — предел прочности однонаправленного КМ.

После подстановки $\tau_{\text{экв}}(\alpha)$ из (5) в (6) найдем реализуемое напряжение в боковых элементах продольного слоя:

$$\sigma_{2\alpha}^{\text{бок}}(\alpha) = \sigma_{\text{вк}} - \frac{\cos \alpha + [\sin \alpha - \sin(\alpha + 2\tau_{\text{экв}}(\alpha))] / 2\tau_{\text{экв}}(\alpha)}{a_{\text{опр}} + \cos(\alpha + 2\tau_{\text{экв}}(\alpha))} E_{\text{к}}, \quad (7)$$

где $\alpha_{T1} \leq \alpha \leq \alpha_{T2}$. Графические зависимости реализуемого напряжения в элементах продольного слоя, построенные по выражениям (6) и (7), показаны на рис. 6.

В дальнейших расчетах и при изготовлении торового баллона примем толщину продольного слоя оболочки постоянной и равной:

$$h_2(\alpha, \tau_{\text{нам}}) = \frac{P_{\text{раз}} R_{\text{опр}}}{2 [\sigma_{k2}(\tau_{\text{нам}})]}, \quad (8)$$

где $P_{\text{раз}}$ — давление разрушения $[\sigma_{k2}(\tau_{\text{нам}})] = \min \{ \sigma_{2\alpha}^{\text{пв}}(\alpha, \tau_{\text{нам}}), \sigma_{2\alpha}^{\text{бок}}(\tau_{\text{экв}}) \}$ — допустимое напряжение на растяжение однонаправленного КМ в продольном слое, определенное из выражения (6) при α_{T2} .

Толщина поперечного слоя намотки изменяется вдоль меридиана тора:

$$h_1(\alpha, \tau_{\text{нам}}) = \frac{P_{\text{раз}} R_{\text{поп}}}{2 [\sigma_{\text{кл}}]} \left(\frac{2a_{\text{поп}} + 1}{a_{\text{поп}} + \cos \alpha} \right), \quad (9)$$

где $R_{\text{поп}} = R_{\text{опр}} + h_2(\tau_{\text{нам}})$ — радиус круговой торовой оболочки; $a_{\text{поп}} = c / R_{\text{поп}}$ — геометрический параметр кругового тора; $[\sigma_{\text{кл}}]$ — допустимое напряжение на растяжение однонаправленного КМ в поперечном слое на большом экваторе тора при $\alpha = 0$ [1]:

$$[\sigma_{\text{кл}}] = \sigma_{\text{вк}} \left(\frac{2a_{\text{поп}} + 1}{2a_{\text{поп}} + 1,414} \right). \quad (10)$$

Масса поперечного и продольного слоев определяется равенством:

$$M_{\text{об}} = S_{\text{об}} h_{\text{об}}^{\text{ср}} \rho_{\text{к}}, \quad (11)$$

где $S_{\text{об}} = 4\pi^2 R_{\text{об}}^2 a_{\text{об}}$ — площадь поверхности оболочки слоя, $h_{\text{об}}^{\text{ср}} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi h_{\text{об}}^{\text{ср}}(\alpha, \tau_{\text{нам}}) d\alpha$ — средняя толщина оболочки слоя. Подстановка значений толщин из (8) и (9) в равенство (11) дает:

$$M_{\text{поп}} = \frac{P_{\text{раз}} V_{\text{об}} \rho_{\text{к}}}{[\sigma_{\text{кл}}(\tau_{\text{нам}})]} \left(\frac{2a_{\text{поп}} + 1}{\sqrt{a_{\text{поп}}^2 - 1}} \right), \quad M_{\text{про}} = \frac{P_{\text{раз}} V_{\text{об}} \rho_{\text{к}}}{[\sigma_{\text{кл}}(\tau_{\text{нам}})]}, \quad (12)$$

где $V_{\text{об}} = 2\pi^2 R_{\text{поп}}^2 a_{\text{поп}}$ — внутренний объем силовой оболочки; $\rho_{\text{к}}$ — плотность однонаправленного КМ.

Наружный диаметр торового баллона:

$$D = 2[c + R_{\text{опр}} + h_2 + h_{10}], \quad (13)$$

где h_{10} — толщина поперечного слоя (9) при $\alpha = 0$.

Относительное приращение массы проектируемой новой силовой оболочки по сравнению с массой силовой оболочки, изготовленной одновременной продольно-поперечной намоткой, определяем по формуле:

$$\Delta M = \frac{M_{\text{со}}^{\text{прк}} - M_{\text{со}}^{\text{мно}}}{M_{\text{со}}^{\text{мно}}}, \quad (14)$$

где $M_{\text{со}}^{\text{прк}} = M_{\text{поп}} + M_{\text{про}}$ — масса проектируемой новой силовой оболочки; $M_{\text{со}}^{\text{мно}}$ — масса силовой оболочки, изготовленной одновременной продольно-поперечной намоткой, при

$\tau_{\text{нам}} = \tau(\alpha_{\text{мин}})$ и $\sigma_{2\alpha, \text{мин}}^{\text{пр}}$ (рис. 6).

Процесс расчета параметров конструкции торового баллона ($V = 9,2$ л, $P_{\text{раз}} = 62$ МПа, $c = 134$), полученного продольно-поперечной намоткой с отдельными углами $\alpha_{\tau_1} = \alpha_{\tau_2} = 30^\circ$ из однонаправленного стеклопластика: $\sigma_{\text{вк}} = 1620$ МПа, $E = 55 \cdot 10^3$ МПа, $\rho_{\text{к}} = 2,02 \cdot 10^{-6}$ кг/мм³ выполнен по результатам испытания кольцевых образцов. Намотка производилась лентой препрега на основе стеклоровинга РВМН10-1260-80 и эпоксидного

связующего Этал-245 с характеристиками: $t_n = 2,5$ мм, $h_n = 0,328$, $\tau_m = 0,021$, при содержании волокон 73,52% и количестве пор 4,48%.

Результаты расчета с учетом 85% реализации прочности стеклопластика в конструкции торового баллона [3] даны в таблице 2. По сравнению с силовой оболочкой, изготовленной одновременной продольно-поперечной намоткой, масса проектируемой новой силовой оболочки торового баллона уменьшена на 5 %.

Таблица 2

Результаты расчета параметров конструкции композитного торового баллона

Параметры	Значения
Радиус сечения оправок для элементов продольного слоя $R_{\text{опр}}$, мм	61
Геометрический параметр оправки $\alpha_{\text{опр}}$	2,198
Расчетное напряжение в продольном слое $\sigma_{к2}$, МПа	1017
Толщина продольного слоя h_2 , мм	1,859
Масса продольного слоя $M_{\text{пр}}$, кг	1,212
Радиус сечения поперечного слоя оболочки $R_{\text{поп}}$, мм	62,836
Геометрический параметр торового баллона $\alpha_{\text{поп}}$	2,133
Расчетное напряжение в поперечном слое $[\sigma_{к1}]$, МПа	1277
Толщина поперечного слоя при: $\alpha = 0, h_1(0)$, мм	2,565
$\alpha = \pi/2, h_1(\pi/2)$, мм	3,767
$\alpha = \pi, h_1(\pi)$, мм	7,093
Масса поперечного слоя $M_{\text{поп}}$, кг	2,697
Масса силовой оболочки баллона $M = M_{\text{поп}} + M_{\text{пр}}$, кг	3,909
Наружный диаметр торового баллона D , мм	398,8
Относительное приращение массы $\Delta M, \%$	-4,938
Масса резинового герметика $M_{\text{ге}}$, кг	0,76
Масса торового баллона с элементами штуцера $M_{\text{бал}}$, кг	5,0

Композитный торовый баллон с вкладным герметизирующим лейнером из резины (камера колеса) изготовлен по предложенной технологии. Элементы продольного слоя

после намотки отверждались на металлических оправках в термопечи при температуре 140°C в течение 6 часов. После сборки продольных элементов с резиновой герметикой и намотки поперечного слоя на станке СНТ-2А весь баллон проходил термообработку в печи при 140°C в течение 6 часов. Готовый композитный торовый баллон представлен на рис. 7.

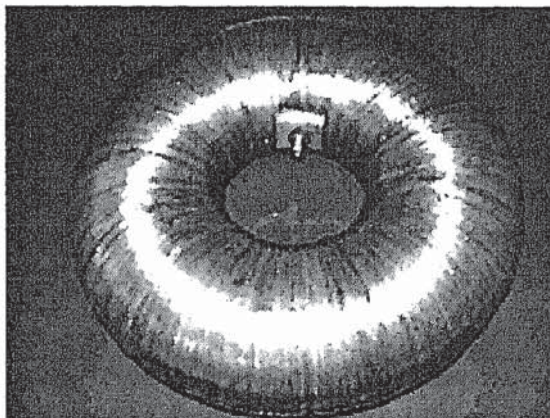


Рис 7. Готовый стеклопластиковый торовый баллон, изготовленный по новой технологии в условиях серийного производства

Изготовленный композитный торовый баллон испытывался на прочность и герметичность внутренним давлением жидкости в бронеканере (рис 8). Первое нагружение производилось воздухом от компрессора. В баллоне давление было поднято до 5 атм.

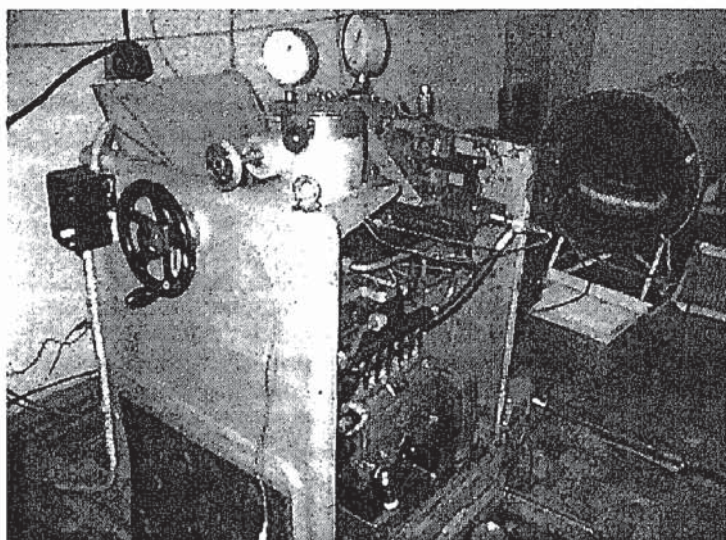


Рис 8. Гидравлическое испытание композитного торового баллона в бронеканере

Баллон при этом помещен в ванну с водой. Наблюдалось выделение пузырьков воздуха, которое постепенно уменьшалось. Вероятно выходил воздух, находящийся между лейнером и силовой оболочкой. Второе нагружение баллона производилось с помощью маслостанции, имеющей масло-водоразделитель для испытания баллонов водой. Давление увеличивалось со скоростью $0,5\text{ МПа/с}$, и при $2,9\text{ МПа}$ произошла разгерметизация полости баллона. Давление резко упало до $0,8\text{ МПа}$, и сохранялось таким при максимальном для этой маслостанции расходе воды. Третье нагружение производилось с помощью гидрона-

соса, имеющего существенно больший расход рабочей жидкости ($1\text{ м}^3/\text{ч}$). Давление внутри силовой оболочки удалось поднять до 6 МПа. Силовая оболочка при этом давлении не разрушилась, но вода интенсивно протекала сквозь нее в виде большого числа струек по всей торовой поверхности баллона (рис. 9).

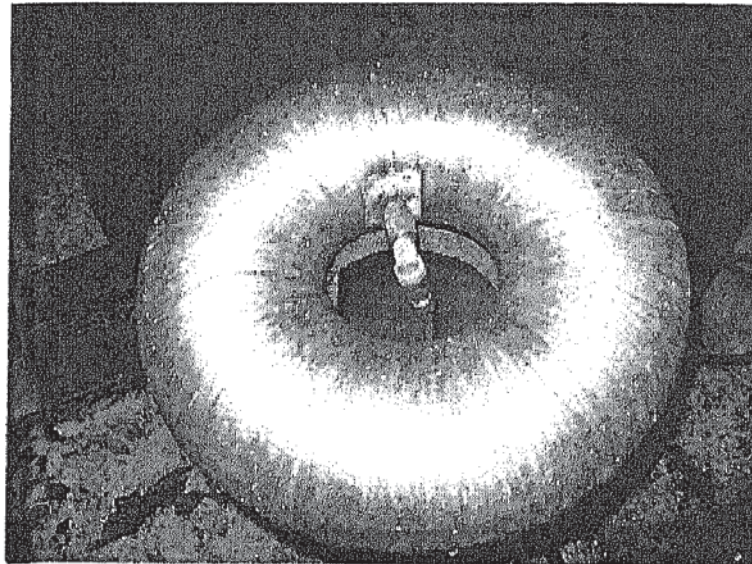


Рис 9. Композитный торовый баллон после испытания водой

Результаты испытаний показали, что если бы резиновый герметик был качественным, то работоспособности композитного торового баллона новой конструкции и схемы процесса изготовления было бы достаточно.

Вследствие исключения одноразовых песчаных оправок из технологического процесса, а также использования последовательно-параллельной схемы намотки слоев, цикл изготовления торового баллона был резко сокращен. С использованием станка СНТ-2А возможно изготовить 4—5 торовых стеклопластиковых баллонов за одну 8-часовую рабочую смену.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комков М. А., Чан Н. Т. Композитный торовый баллон для дыхательных аппаратов с продольно-поперечной схемой армирования силовой оболочки // Вестник МГТУ, Машиностроение. — 2006. — № 3. — С. 10—19.
2. Комков М. А. Определение конструктивных и технологических параметров намотки композитных баллонов торовой формы: Учебное пособие. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. — 24 с.
3. Альперин В. И., Корольков Н. В., Мотавкин А. В. и др. Конструкционные стеклопластики. — М.: Химия, 1979 — 360 с.