

М. А. Комков, В. В. Сабельников, К. П. Баслык

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТРУБОПРОВОДОВ, НАМОТАННЫХ ИЗ ПОЛИИМИДОФТОРОПЛАСТОВОЙ ПЛЕНКИ

Рассмотрены вопросы проектирования и изготовления намоткой из полиимидных пленок многослойных оболочек прямо- и криволинейных трубопроводов. Предложен способ соединения хвостовика фланца с пленочной оболочкой, представлены результаты испытаний трубопроводов из многослойных пленок.

E-mail: cm12@sm.bmstu.ru

Ключевые слова: криогенное топливо, пленочные оболочки, криволинейные трубопроводы, метод намотки.

В пневмогидросистемах (ПГС) летательных аппаратов применяют большое количество внутрибаковых прямо- и криволинейных трубопроводов из алюминиевых сплавов, имеющих излишне большую массу. Все возрастающие рабочие параметры двигательных установок ракетно-космической техники, авиации и наземного транспорта, работающих на криогенных топливах (жидком кислороде, водороде или метане) требуют создания легких, прочных и герметичных трубопроводов для нормальных, криогенных и повышенных температур.

Указанным требованиям наиболее полно отвечают криволинейные трубопроводы средних ($d_y = 50 \dots 100$ мм) и больших ($d_y = 150 \dots 300$ мм) размеров, изготовленные многослойной поперечной намоткой узких ($b_d = 20 \dots 40$ мм) лент из высокопрочных ($\sigma_{\text{ПМФ}} = 80 \dots 90$ МПа) полиимидфторопластовых (ПМФ) пленок [1]. Это позволяет снизить уровень изгибных нагрузок при перемещении фланцев труб в процессе их сборки и монтажа. Тем самым удастся, с одной стороны, отказаться от большинства компенсаторов (сильфонов) в системе ПГС, а с другой — при необходимости в несколько раз увеличить несущую способность трубопроводов за счет дополнительной спирально-поперечной намотки на пленочную оболочку однонаправленного композиционного материала, например органо- или углепластика, стального волокна.

Полиимидная пленка с двусторонним фторопластовым покрытием ПМФ-352 надежно работает как при повышенных (до 250 °С), так и при криогенных (до 20 К) температурах. Прочность пленки при температуре 150 °С достаточно высока и составляет 57...60 МПа, а при температуре жидкого азота (77 К) она увеличивается в 1,5 раза. При этом пленка сохраняет гибкость и эластичность вплоть до тем-

пературы жидкого гелия (4,2 К). Плотность пленки $\rho_{\text{ПМФ}} = 1420 \text{ кг/м}^3$, модуль упругости (рис. 1) при нормальной температуре $E_{\text{ПМФ}} = 2,8 \dots 3,0 \text{ ГПа}$.

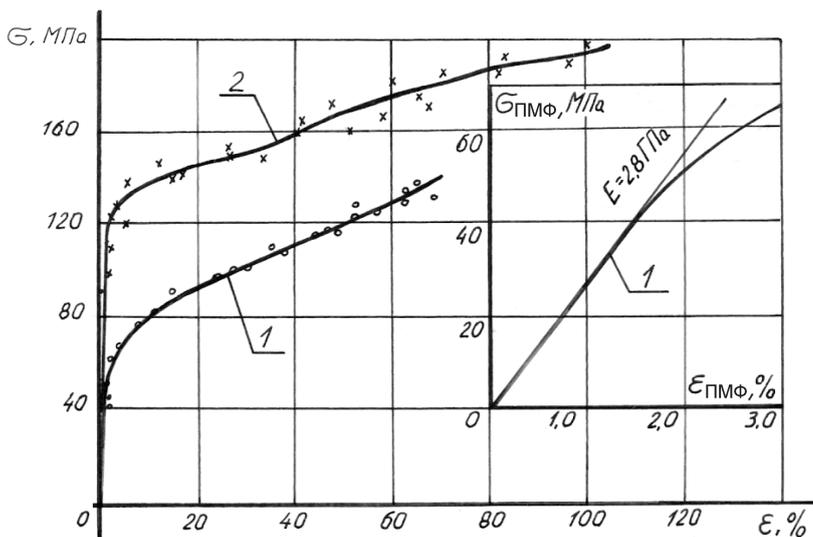


Рис. 1. Диаграммы одноосного растяжения пленки ПМФ-352 (1) и лавсановой пленки ПЭТФ-0 (2)

Важным преимуществом пленки ПМФ-352 является ее свариваемость (спекаемость) под давлением и нагреве до температуры плавления фторопласта $T_{\text{ф}} = 325 \text{ }^\circ\text{C}$, что обеспечивает надежную герметичность многослойной оболочки трубопровода. Пленка нетоксична до температуры $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Конструкции трубопроводов, изготовленные из этой пленки, стойки к воздействию практически всех газов, к жидким водороду, кислороду, керосину и их парам. Максимальные относительные удлинения при разрыве пленки марки ПМФ-352 при одноосном растяжении (см. рис. 1) достаточно высоки, однако упругие деформации ϵ , при которых напряжения достигают $0,75\sigma_{\text{ПМФ}}$, составляют всего $2,5 \dots 3,0 \%$. Такие значения ϵ близки к предельным разрушающим деформациям однонаправленных стекло-, органо- и углепластиков. При температуре жидкого азота прочность материала тороидальной оболочки [2] из многослойной пленки ПМФ-352 составляет 110 МПа , а максимальная разрушающая деформация равна $2,96 \%$.

Рассмотрим криволинейный трубопровод (рис. 2), состоящий из двух повторяющихся в различном сочетании элементов: прямолинейного и изогнутого. Трубопровод изготовлен совместной поперечной намоткой узких лент с постоянным шагом вдоль его продольной оси.

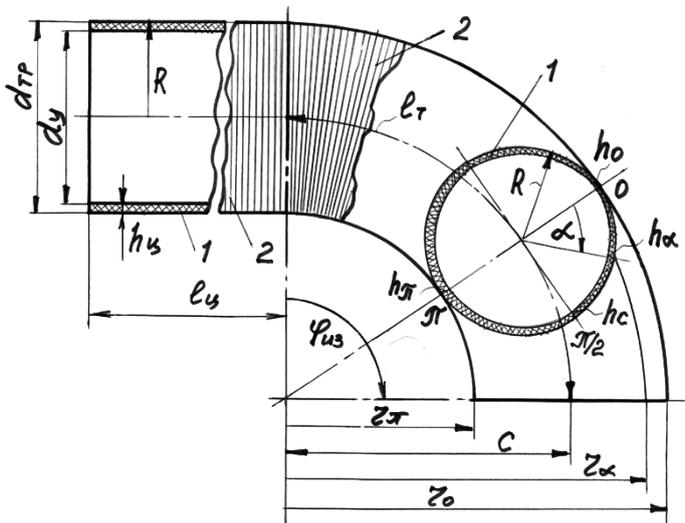


Рис. 2. Геометрические размеры типового элемента криволинейного трубопровода и его система координат:

1 — оболочка из пленки ПМФ-352; 2 — направление укладки узких лент на криволинейную поверхность оправки с постоянным шагом намотки

Далее все направления на поверхности оболочки, совпадающие с осью трубопровода, будем называть осевыми (или продольными), а направления, совпадающие с контуром поперечного сечения, — радиальными (или поперечными).

Изогнутый (тороидальная поверхность) участок трубопровода образован вращением окружности радиусом R вокруг центральной оси кругового тора на угол $\varphi_{из}$ изгиба трубы. Прямолинейный участок имеет такой же радиус сечения R и протяженность $l_{ц}$.

Трубопровод находится под внутренним давлением p жидкости или газа. Полагая, что сечение трубопровода под давлением всюду остается круговым, запишем главные погонные силы для прямолинейного и изогнутого участков трубопровода [3] в системе координат тороидальной оболочки (см. рис. 2):

$$N_1 = \sigma_{ц} h_{ц} = pR, \quad N_2 = \sigma_{ц} h_{ц} = pR/2; \quad (1)$$

$$N_1 = \sigma_{тор} h_{т\alpha} = \frac{pR}{2} \frac{2a + \cos \alpha}{a + \cos \alpha}, \quad N_2 = \sigma_{тор} h_{т\alpha} = pR/2, \quad (2)$$

где $\sigma_{ц}$, $\sigma_{тор}$ — напряжение на цилиндрическом и тороидальном участках по сечению оболочки (координата α); $h_{ц}$, $h_{т\alpha}$ — толщина слоев намотки на этих участках трубы; $a = c/R$ — безразмерный параметр изгиба трубы (геометрический параметр тора); c — расстояние от оси вращения до вершины тора.

Из уравнений (1) следует, что расчетная толщина оболочки на прямолинейном участке трубопровода в поперечном направлении

$$h_{1ц} = h_{1с} = p_{раз} R / \sigma_{ПМФ} = \text{const}, \quad (3)$$

где $h_{1с}$ — толщина оболочки на вершине изогнутого участка; $p_{раз}$ — давление разрушения; $\sigma_{ПМФ}$ — предел прочности при растяжении многослойной пленочной оболочки.

Для изогнутого участка исходя из условия непрерывности намотки в поперечном направлении $r_{\alpha} h_{\alpha} = \text{const}$ переменная толщина слоя

$$h_{1т} = h_{1\alpha} = h_{10} \frac{r_0}{r_{\alpha}} = h_{10} \frac{a+1}{a+\cos \alpha}, \quad (4)$$

где $r_{\alpha} = R(a + \cos \alpha)$ — текущий радиус вращения тора; h_{10} , $r_0 = R(a+1)$ — толщина слоя намотки и радиус вращения оболочки на большом экваторе тора при угле $\alpha = 0$.

Подставив значения для $h_{1\alpha}$ из выражения (4) в уравнение (2), найдем переменное напряжение, действующее в поперечном направлении изогнутого участка:

$$\sigma_{1тор} = \sigma_{1\alpha} = \frac{pR(2a + \cos \alpha)}{2 h_{10}(a+1)}. \quad (5)$$

Напряжения (5) достигают максимума на большом экваторе тора, следовательно, начальная толщина поперечного слоя намотки на изогнутом участке

$$h_{10} = \frac{p_{раз} R(2a+1)}{2 \sigma_{ПМФ}(a+1)}. \quad (6)$$

Если подставить выражение (6) в соотношение (4) при угле $\alpha = \pi/2$, можно вычислить толщину оболочки, которую требуется намотать на цилиндрическом участке трубопровода:

$$h_{1ц} = h_{1с} = \frac{p_{раз} R(2a+1)}{\sigma_{ПМФ} 2a}. \quad (7)$$

Рассчитаем массу многослойной полиимидной оболочки, которая образована совместной намоткой прямолинейного и изогнутого участков трубопровода с толщиной стенки $h_{1ц} = h_{1с}$, определенной по формуле (7):

$$M_{\text{кр.тр}} = M_{\text{ц}} + M_{\text{тор}} = 2\pi R^2 l_{\text{тр}} \frac{p_{\text{раз}} \rho_{\text{ПМФ}}}{\sigma_{\text{ПМФ}}} \frac{2a+1}{2a}, \quad (8)$$

где $M_{\text{ц}}$, $M_{\text{тор}}$ — массы участков трубопровода; $l_{\text{тр}} = l_{\text{ц}} + l_{\text{тор}} = l_{\text{ц}} + aR[\varphi_{\text{изг}}/(2\pi)]$ — длина прямолинейного и изогнутого участков по осевой линии.

Сравнив массу криволинейного трубопровода $M_{\text{кр.тр}}$ с массой цилиндрического трубопровода $M_{\text{ц.тр}}$ такой же длины $l_{\text{тр}}$, но с толщиной стенки $h_{\text{ц}}$, получим

$$M_{\text{кр.тр}}/M_{\text{ц.тр}} = (2a+1)/(2a). \quad (9)$$

Из соотношения (8) следует, что для параметра изгиба трубы $a = 3 \dots 4$ увеличение массы криволинейного трубопровода по сравнению с массой цилиндрической пленочной оболочки той же длины $l_{\text{тр}}$ и такого же давления составляет 16,7—12,5 %.

Чтобы сравнить массу намотанного полиимидного трубопровода, имеющего переменную толщину стенки на изогнутом участке, с его металлическим аналогом, имеющим постоянную толщину стенки на всей длине, запишем напряжения для изогнутого участка металлического трубопровода:

$$\sigma_{\text{мет.тор}} = \frac{pR}{2h_{\text{мет}}} \frac{2a + \cos \alpha}{a + \cos \alpha}. \quad (10)$$

Максимальные напряжения $\sigma_{\text{мет.тор}}$ достигаются на малом экваторе тора. Определив $h_{\text{мет}}$ из выражения (10) при угле $\alpha = \pi$, найдем массу криволинейного трубопровода длиной $l_{\text{тр}}$, полученного методом гибки из цилиндрической трубы постоянной толщины:

$$M_{\text{мет.тр}} = M_{\text{ц}} + M_{\text{тор}} = 2\pi R^2 l_{\text{тр}} \frac{p_{\text{раз}} \rho_{\text{мет}}}{\sigma_{\text{т}}} \frac{2a-1}{2(a-1)},$$

где $\rho_{\text{мет}}$ — плотность металла; $\sigma_{\text{т}}$ — предел текучести металла.

Сравним по массе криволинейные трубопроводы из полиимидной пленки и из металла:

$$\frac{M_{\text{ПМФ тр}}}{M_{\text{мет.тр}}} = \frac{M_{\text{ПМФ тр}}}{M_{\text{мет.тр}}} = \frac{\sigma_{\text{т}} \rho_{\text{ПМФ}}}{\rho_{\text{мет}} \sigma_{\text{ПМФ}}} \frac{(a-1)(2a+1)}{a(2a-1)}. \quad (11)$$

Согласно выражению (11), для параметра изгиба трубы $a = 3 \dots 4$ снижение массы криволинейного трубопровода из пленки ПМФ-352

по сравнению с его металлическим аналогом (из сплава АМг-6 с $\sigma_T = 180$ МПа, $\rho_{мет} = 2,64$ г/см³) составит не менее 17,9 %, так как металлический трубопровод практически не может быть изготовлен с расчетной толщиной стенки.

Криволинейные трубопроводы изготавливают методом многослойной намотки пленки ПМФ-352 шириной 20...40 мм на стальную технологическую оправку с последующим спеканием намотанных слоев пленки при температуре 325 °С в течение 0,5...1,0 ч, последующим охлаждением и удалением оправки из полости трубопровода. Намотка — универсальный и производительный метод изготовления композитных конструкций повторяющимися витками нитей или лент в непрерывном автоматизированном режиме.

При укладке узкой ленты шириной $b = b_{л}$ и толщиной $\delta_{л}$ на цилиндрическую оправку радиусом R (рис. 3) формирование структуры материала оболочки зависит от величины нахлеста Δb или шага намотки $t = t_{нм} = b - \Delta b$.

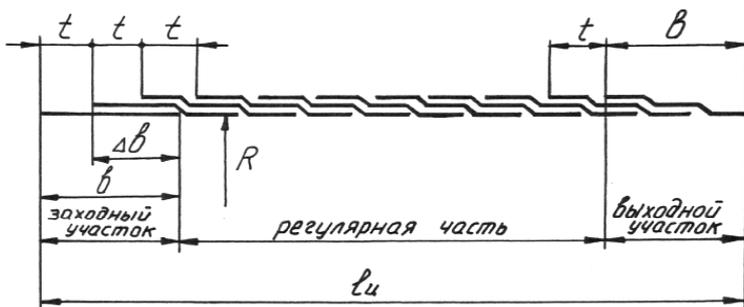


Рис. 3. Схема укладки ленты из пленки ПМФ-352 при намотке на цилиндрическую поверхность

За один цикл намотки, или за один проход раскладчика ленты вдоль оси трубопровода на длину $l_{тр}$, оболочка может быть выполнена однослойной, если $\Delta b = 0$ ($t_{нм} = b_{л}$), либо многослойной, если шаг намотки $t_{нм} < b_{л}$. Если шаг $t_{нм}$ намотки кратен ширине ленты $b_{л}$, то за один проход раскладчика будет намотано целое число слоев ленты $[m] = b/t_{нм} = 1, 2, \dots, n$, а толщина намотки на регулярном участке $h_{тр} = [m] \delta_{л}$ будет постоянной на всей длине по осевой линии трубопровода.

При этом число проходов $k_{прх}$ раскладчика вдоль оси изделия для намотки расчетной толщины оболочки определяют из отношения $[k] = h_{об} / [m] \delta_{л}$. Фактическая толщина оболочки трубопровода

$$h_{об}^{\phi} = [m] \delta_{л} k_{прх} = z_{сл} \delta_{л},$$

где $z_{сл} = [m] k_{прх}$ — целое число слоев ленты в намотанной толщине оболочки.

Заходный и выходной участки трубопровода, где толщина меньше расчетной, дополнительно доматывают до толщины регулярной части на хвостовиках фланцев трубопровода.

Поскольку намотку относительно жесткой полиимидной ленты на участке изгиба трубопровода осуществляют на поверхность двойной кривизны, то для обеспечения плотного прилегания ленты к оправке минимально необходимое натяжение ленты определяют по формуле [3]

$$q_{нт \min} = E_{ПМФ} b_{л} \delta_{л} \left\{ \frac{2}{\tau_{л}} \int_0^{\tau_{л}/2} \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{\pi} \sqrt{1 + \frac{\tau^2 \sin^2 \alpha}{(a + \cos \alpha)^2}} d\alpha \right] d\tau - 1 \right\},$$

где $\tau_{л} = b_{л} / d_{сеч}$ — относительная ширина ленты ($d_{сеч}$ — диаметр поперечного сечения трубопровода).

Для полиимидной ленты при $E_{ПМФ} = 3$ ГПа, $b_{л} = 20$ мм, $\delta_{л} = 60$ мкм, $\tau_{л} = 2/7$, $a = 3$ было получено $q_{нт \min} = 1,02$ Н.

В производственных условиях намотку трубопроводов из пленки ПМФ-352 проводят со скоростью $v_{нм} = 6...8$ м/мин. При этом натяжение ленты $q_{нм.л} = (0,06...0,08) Q_{раз}$, где $Q_{раз} = \sigma_{ПМФ} b_{л} \delta_{л}$ — разрушающая нагрузка (сила) ленты при растяжении.

Для ленты шириной $b_{л} = 20$ мм и толщиной $\delta_{л} = 60$ мкм из пленки ПМФ-352 с пределом прочности на разрыв $\sigma_{ПМФ} = 110$ МПа разрушающая сила при растяжении будет $Q_{раз} = 132$ Н, а натяжение ленты при намотке составит $q_{нм.л} = 7,9...10,6$ Н.

Прямо- и криволинейные трубопроводы из полиимидной пленки снабжены металлическими или пластмассовыми фланцами [4]. Чтобы сечение трубопровода всюду оставалось постоянным ($d_y = \text{const}$), заделка пленочной оболочки в металлический фланец (рис. 4) осуществляется на расширяющем коническом хвостовике, имеющем уступ или бурт высотой $h_{ПМФ} = (0,03...0,06)R$, и в канавке (горловине) фланца.

Угол конусности хвостовика (см. рис. 4) $\gamma = 9...12^\circ$, т. е. в пределах угла трения ленты при ее намотке на хвостовик металлического фланца. Длина конуса и длина канавки фланца обычно составляет $l_{кон} = 15...19$ мм, ширина торца фланца $l_{торц} = 6...7$ мм,

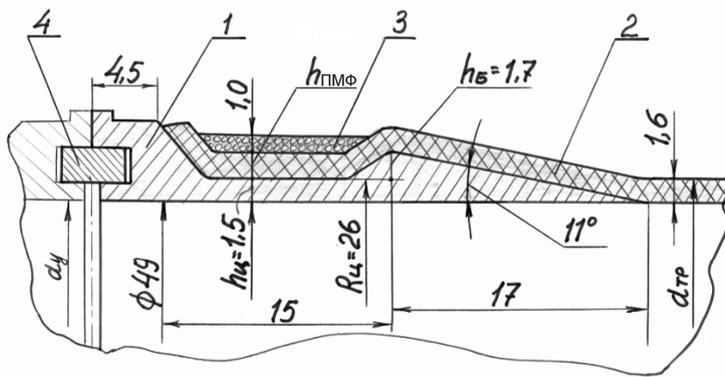


Рис. 4. Конструктивная схема соединения полиимидной пленочной оболочки с металлическим фланцем трубопровода:

1 — фланец из стали 12Х18Н10Т; 2 — пленка ПМФ-352; 3 — поперечная обмотка стальным волокном; 4 — кольцо, центрирующее два трубопровода

а вся длина фланца — не более $l_{\text{фл}} = 35 \dots 40$ мм. Диаметр фланца $d_{\text{фл}} = d_y + 12$ мм, где $d_y = d_{\text{тр}} - 2h_{\text{ПМФ}}$.

Прямолинейные участки трубопровода из пленки ПМФ-352 диаметром $d_y = 50$ мм, длины 295 мм с толщиной стенки $h_{1\text{ц}} = 1,15$ мм наматывали на металлическую оправку, а изогнутые участки — на вымываемую песчано-солевую оправку. Цилиндрические образцы трубопроводов прошли испытание внутренним давлением жидкости. Разрушение образцов водой при нормальной температуре произошло вдоль образующей цилиндра при среднем давлении $p_{\text{раз}} = 4,9$ МПа, а разрушение жидким азотом ($t_{\text{ж}} \approx 186$ °С) — при давлении $p_{\text{раз}} = 7,4$ МПа. Максимальные относительные деформации разрушения жидким азотом составили 3,08 %. При этом прочность полиимидной оболочки увеличилась от 76,9 до 112 МПа, а значение модуля упругости возросло от 3,0 до 7,1 ГПа.

Цилиндрические образцы из пленки ПМФ-352 были испытаны на герметичность при нормальной температуре. Утечка газа (гелия) по методу натекания в барокамере составляла не более $1 \cdot 10^{-4}$ л·мкм/с = $1,33 \cdot 10^{-8}$ Вт. После проведения 30 циклов захлаживания жидким азотом резко выраженных поверхностных дефектов материала стенки не обнаружено, а величина утечки газа (негерметичность трубопровода) лежит в допустимых пределах, изменяясь от $5 \cdot 10^{-8}$ до $9 \cdot 10^{-8}$ Вт.

Показано, что криволинейные трубопроводы из полиимидной пленки ПМФ-352 работоспособны в среде жидкого кислорода и водорода, обладают достаточной прочностью и герметичностью, имеют на 20 % меньшую массу по сравнению с аналогами из сплава АМг-6

и могут быть рекомендованы для их замены в пневмо- и гидросистеме изделий, работающих на криогенных топливах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полиимиды – класс термостойких полимеров / М.П. Бессонов, М.М. Котон, В.В. Кудрявцев, Л.А. Лайус. – Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1983. – 328 с.
2. Буланов И.М., Комков М.А. Применение жестких полимерных пленок в криогенных топливных системах аэрокосмической техники // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Сер. Машиностроение. – 1992. – № 1. – С. 14–24.
3. Комков М.А., Тарасов В.А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 431 с.
4. Сабельников В.В., Комков М.А., Саморядов А.В. Технология склеивания элементов криогенного трубопровода // Клеи. Герметики. Технологии. – 2005. – № 1. – С. 16–20.

Статья поступила в редакцию 19.09.2012