

УДК 678.027.7:677

В. А. Витренко, докт. техн. наук, проф., **Г. В. Сыровой**, канд. техн. наук, доц.,
Е. В. Синдеева, ст. преподаватель

Луганский национальный университет имени Владимира Даля

Тел.: +38(095)0703018; E-mail: sii@i.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В СТРУКТУРЕ КОМПОЗИТНОГО СЛОЯ ДНИЩА МАЛОГАБАРИТНОГО КОРПУСА

Проведен анализ влияния зонной структуры намотки на деформационные свойства малогабаритных корпусов. Исследовано влияние изменения шага намотки армирующего материала в кольцевом слое малогабаритного корпуса, а также изменение массового совершенства малогабаритных корпусов и эквивалентных деформаций от степени комбинирования намотки кольцевого слоя. Исследования позволили получить равномерное распределение значений деформации в переходной части между днищем и центральной частью малогабаритного корпуса.

Ключевые слова: зонная структура, намотка, массовое совершенство, параметр массовой эффективности, малогабаритный корпус.

V. A. Vitrenko, G. V. Sirovoj, E. V. Sindeyeva

STRESS ANALYSIS IN THE STRUCTURE OF THE COMPOSITE LAYER BOTTOMS SMALL CASE

The analysis of the influence of the zone structure of the winding on the deformation properties of small bodies. The influence of the change in the step of winding the reinforcing material in the annular layer of a small body, as well as the change in the mass perfection of small bodies and equivalent deformations from the degree of combination of the winding of the annular layer. Studies have allowed to obtain a uniform distribution of deformation values in the transition between the bottom and the Central part of the small body.

Keywords: band structure, coiling, mass excellence, the parameter of mass efficiency, compact body.

1. Введение

Основным комплексным критерием качества для малогабаритных корпусов остаётся параметр массовой эффективности [1], который равен отношению энергоёмкости корпуса к его массе

$$W = PV/M, \quad (1)$$

где P – разрушающее внутреннее давление в корпусе;

V – внутренний полезный объём;

M – масса силовой части корпуса.

Данный критерий отражает совершенство силовой схемы малогабаритного корпуса и степень реализации исходной прочности используемого композитного материала, которые в значительной степени зависят от проектных решений, заложенных в технологическую схему производства малогабаритных корпусов [2].

Добиться оптимального результата при изготовлении малогабаритных композитных корпусов позволяет используемое технологическое оборудование и приспособления. Другими словами, процесс формообразования изделия должен быть совмещен с процессом формирования заданной структуры материала, обеспечивающей требуемые свойства конструкции.

Эта конструкторско-технологическая и материаловедческая задача может быть решена лишь по пути автоматизированного проектирования композитных конструкций

и методов их изготовления намоткой, выкладкой, прессованием, пултрузией и др. на производственном оборудовании, имеющем числовое программное управление [3].

2. Основное содержание и результаты работы

Целью данной работы является исследование напряжений, возникающих при намотке днища зонной структурой из композитного материала и, их влияние на массовое совершенство малогабаритного корпуса.

Остановимся на определении углов армирования φ_{ai} и толщин слоев h_{ai} , входящих в уравнение

$$\sigma_T h_M + \bar{\sigma}_1 \sum_{i=1}^2 h_{ai} \cos^2 \varphi_{ai} = \frac{1}{2} \bar{p} a \quad (2)$$

По конструктивным соображениям, как правило, задается радиус полюсного отверстия, который для рассматриваемого баллона составил $r_{01} = 13,5 \text{ мм}$. Угол армирования φ_{ai} находится по формуле

$$r_{01} = a \sin \varphi_{ai} \quad (3)$$

и оказывается равным 11° . Этот угол соответствует внутренней кромке, наматываемой ленты, которая касается контура полюсного отверстия. При ширине ленты $w = 10 \text{ мм}$ её наружная кромка имеет радиус $23,5 \text{ мм}$, что соответствует углу армирования 20° . Замеренный угол армирования на экваторе днища экспериментального малогабаритного корпуса оказался равным $9,6^\circ$, соответственно $\varphi_{a1} = 9,6^\circ$. Аналогичным образом получен угол армирования второго слоя, т.е. $\varphi_{a2} = 22^\circ$. При этом, согласно равенству (3), $r_{02} = 26 \text{ мм}$. Наибольший вклад в восприятие осевой силы обеспечивает первый слой с углом армирования $9,6^\circ$ и его толщина должна быть максимально возможной.

Как уже отмечалось, толщина этого слоя на экваторе днища определяется ограничением на толщину слоя в окрестности полюсного отверстия, где она значительно возрастает (рис. 1). Для оценки толщины слоя при проектировании малогабаритного корпуса использовалось равенство:

$$h_i(r) = h_{ai} \frac{a \cos \varphi_{ai}}{r \cos \varphi_i(r)}, \quad (4)$$

которое справедливо при радиусах больших $r_w = r_{01} + w$, где w – ширина ленты (при $r = r_{01}$ формула (4) дает бесконечно большое значение для толщины слоя).

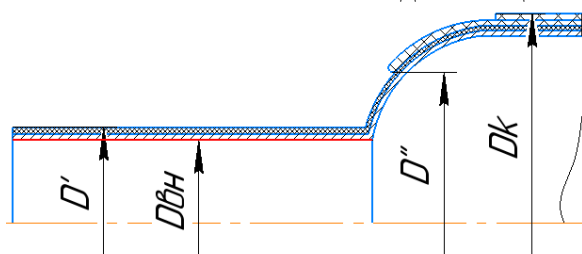


Рисунок 1. Радиальное разбиение днища корпуса на зоны

При $r \leq r_w$ толщина днища считалась постоянной и равной толщине при $r = r_w$. Такой характер изменения толщины первого слоя приближенно соответствует реаль-

ному закону изменения толщины слоя, показанному на рис. 1

Проведенный анализ показал, что допустимая максимальная толщина (порядка 10 мм, соизмеримая с толщиной цилиндрической части баллона) реализуется при намотке 6 двойных спиральных слоев, что при найденной толщине элементарного слоя соответствует толщине первого слоя на экваторе днища $h_{a1}=3,6$ мм. Для оценки толщины второго слоя с углом армирования 22° можно воспользоваться уравнением (4). Поскольку вклад лайнера и первого слоя известен, можно оценить требуемую величину толщины второго слоя. Она составляет $h_{a2}=1,8$ мм, что соответствует трем двойным спиральным слоям.

Структура намотки композитной оболочки малогабаритного корпуса приведена в табл. 1.

Как показано в работе [4], в равнонапряженном днище малогабаритного корпуса условие прочности в осевом направлении автоматически обеспечивает прочность днища в кольцевом направлении. Однако цилиндрическая часть малогабаритного корпуса должна быть усилена кольцевыми слоями, суммарная толщина которых определяется из условия прочности цилиндрической части в кольцевом направлении, т.е.

$$\sigma_T h_M + \bar{\sigma}_1 \sum_{i=1}^2 h_{ai} \sin^2 \varphi_{ai} + h_k \bar{\sigma}_1 = \bar{p} a \tag{5}$$

Подставляя найденные выше параметры и определяя толщину кольцевого слоя, найдем $h_k=8,06$ мм. При толщине элементарного слоя 0,3 мм число кольцевых слоев составляет 27, что соответствует суммарной толщине кольцевых слоев $h_k=8,1$ мм. Таким образом, условие прочности цилиндрической части малогабаритного корпуса в кольцевом направлении обеспечено.

Контур днища рассматриваемого малогабаритного корпуса строится в результате численного интегрирования уравнений в пределах толщины оболочки и исследовано в работе [5], где установлено, что рациональным является совмещение теоретического контура с меридианом срединной поверхности днища.

Поскольку в оболочке, сечение которой показано на рис. 1, меридиана срединной поверхности имеет достаточно сложную форму, при проектировании малогабаритного корпуса предполагалось, что теоретический контур совпадает при $r < b$ с пунктирной линией, показанной на рис. 2, а при $r > b$ – с меридианой наружной поверхности первого слоя.

Таблица 1. Структура намотки композитной оболочки малогабаритного корпуса

Номер слоя, i	Количество двойных спиральных слоев	Угол армирования на экваторе, φ_{ai}°	Толщина на экваторе, H_{ai} , мм	Структура цилиндрической части
1	4	16	3,6	XII, XII
2	2	22	1,8	XII

3. Общий алгоритм и рекомендации

Используя проектные параметры днища корпуса: три толщины h_{ai} и два угла армирования φ_{ai} при $r = a$ и подставляя известные величины σ_T , h_M , \bar{P} и a , в формулу 5, и

используя для моделирования программный комплекс ANSYS проведем исследование намотки двух малогабаритных корпусов.

В результате исследования необходимо определить минимальную величину параметра массовой эффективности при двузонной намотке днища.

Для моделирования малогабаритных корпусов задаемся следующими допущениями:

- намотка корпусов выполняется стеклонитью ЕС-7х34-80(3);
- внутренне давление 20,4 МПа.
- моделируем малогабаритный корпус с днищем, выполненным однозонной и двузонной намоткой.

Корпус с однозонной намоткой днища выполняем по расчётной схеме на рис. 3. В нашем случае мы будем членить оболочку на зоны, границы которых определяются заданными углами армирования: 90° (на полюсном отверстии), $70^\circ, 50^\circ, 30^\circ, 20^\circ, 15^\circ$ (на цилиндрической части) градусов. При этом угол армирования в пределах каждой зоны примем равным среднему арифметическому углов на границах.

Зная закон изменения ориентации арматуры, можно определить толщину пакета (рис. 2) для произвольной точки образующей – она будет зависеть от радиуса и угла армирования, подчиняясь уравнению

$$h = \frac{ah_a \cos \varphi_a}{\sqrt{r^2 - r_0^2}}, \quad (6)$$

где h – толщина оболочки;

φ_a – угол армирования на экваторе при $r=r_a$.

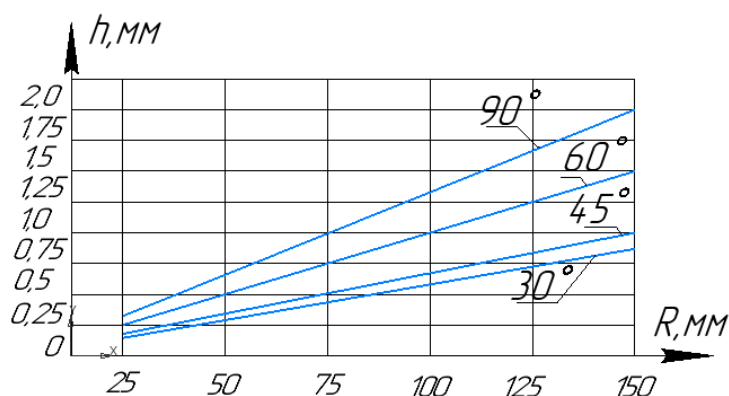


Рисунок 2. Толщина пакета КМ в зависимости от радиуса днища малогабаритного корпуса

Данная зависимость неприменима вблизи полюсного отверстия, поскольку рассчитанная с ее помощью толщина стремится к бесконечности. Абстрагируясь от подробностей, требующих специального анализа, получаем профиль сечения вблизи отверстия простой интерполяцией из «достоверной» зоны.

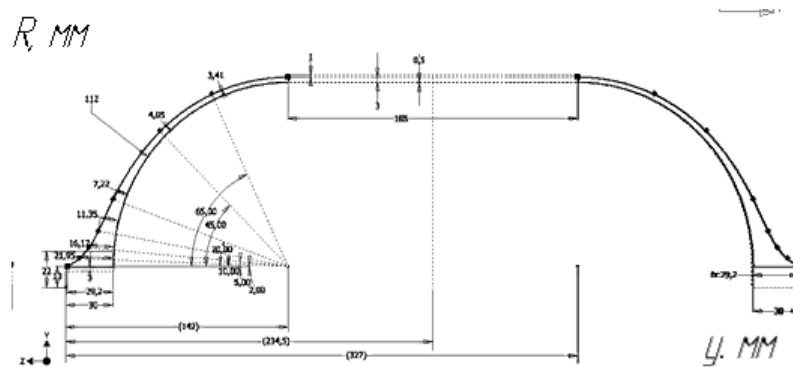


Рисунок 3. Расчётная геометрическая схема намотки малогабаритного корпуса с однослойной намоткой дна

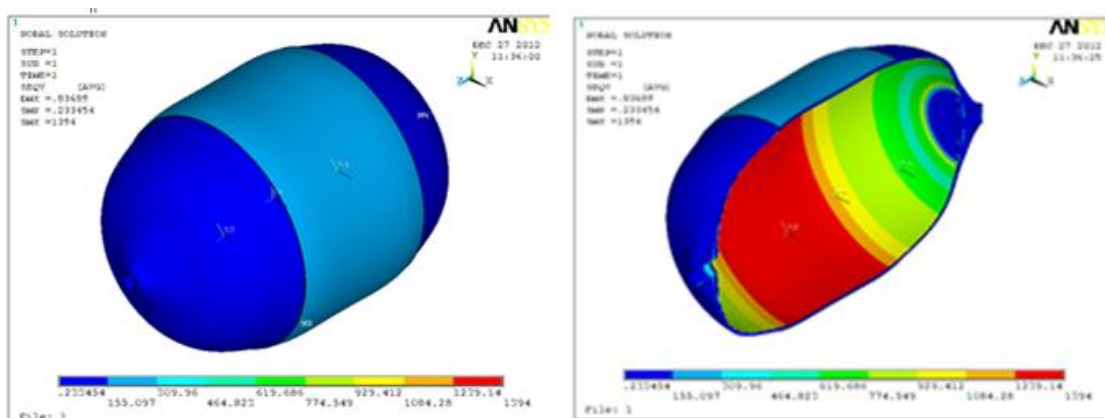


Рисунок 4. Характер распределения эквивалентных напряжений для малогабаритного корпуса с однослойной намоткой дна

Исходя из расчетов (рис.4) напряжения в зоне перехода от цилиндрической части к дну составили 115,0 МПа.

Само поле распределения эквивалентных напряжений в районе дна показано на рис. 5, где явно присутствуют три зоны напряжений. Зона I – возникающие напряжения на пере закладного фланца, зона II – напряжения, возникающие в толщине спирального слоя и зона III – напряжения, возникающие в переходной части между кольцевыми и спиральными слоями (наиболее опасные).

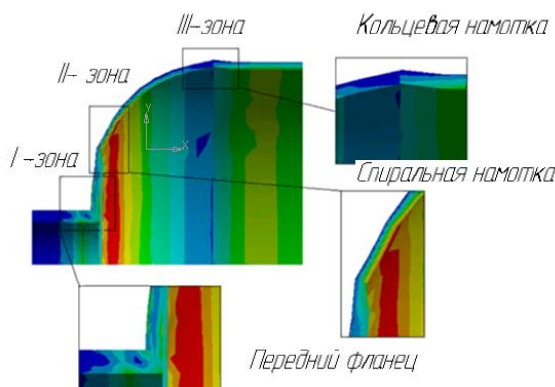


Рисунок 5. Поле распределения эквивалентных напряжений в районе дна

При расчете получено распределение числовых значений деформаций $d(R)$ композитного материала по днищу и центральной части малогабаритного корпуса диаметром 135 мм при однозонной намотке (рис. 6).

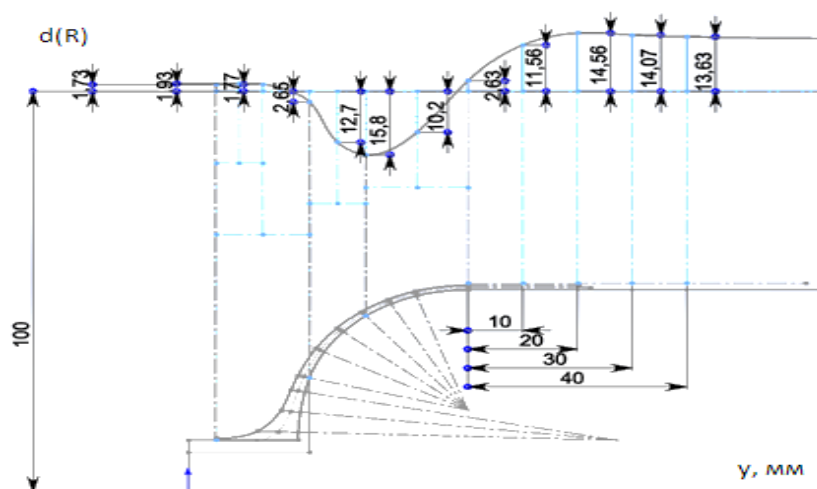


Рисунок 6. Распределение значений деформаций $d(R)$ по днищу и центральной части малогабаритного корпуса

В результате расчетов видно (рис.6), что скачок напряжений приходится на зону III перехода с кольцевого композитного слоя на спиральный.

Для сравнения проведем расчет малогабаритного корпуса, намотанного композитным материалом в районе днища двумя зонами.

При такой расчётной схеме намотки малогабаритного корпуса, получен следующий характер распределения эквивалентных напряжений, который показан на рис. 7.

При этом напряжения в зоне перехода от цилиндрической части к днищу составили 140,0 Мпа, а распределение значений деформаций $d(R)$ по днищу и центральной части малогабаритного корпуса диаметром 135 мм при двузонной намотке композитным материалом, показано на рис. 8.

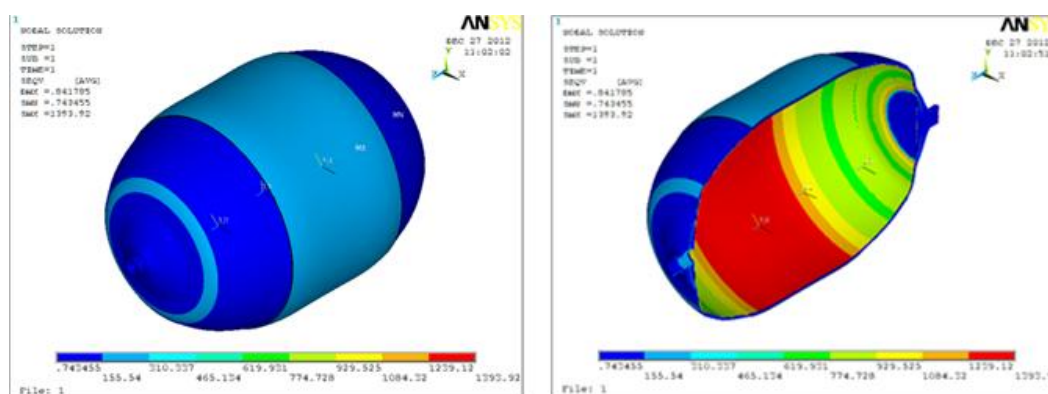


Рисунок 7. Характер распределения эквивалентных напряжений для малогабаритного корпуса с двузонной намоткой днища

Сравнивая графики деформаций $d(R)$ (рис.6 и 8) можно отметить, что при намотке композитным материалом двумя зонами днища малогабаритного корпуса, ради-

альные напряжения в переходной части снижаются, что в свою очередь приводит к снижению деформаций в этой части днища малогабаритного корпуса от кольцевых к спиральным слоям.

По результатам исследования определены массы намотанных малогабаритных корпусов для диаметра оболочки 101 мм и 135 мм (табл. 2, 3).

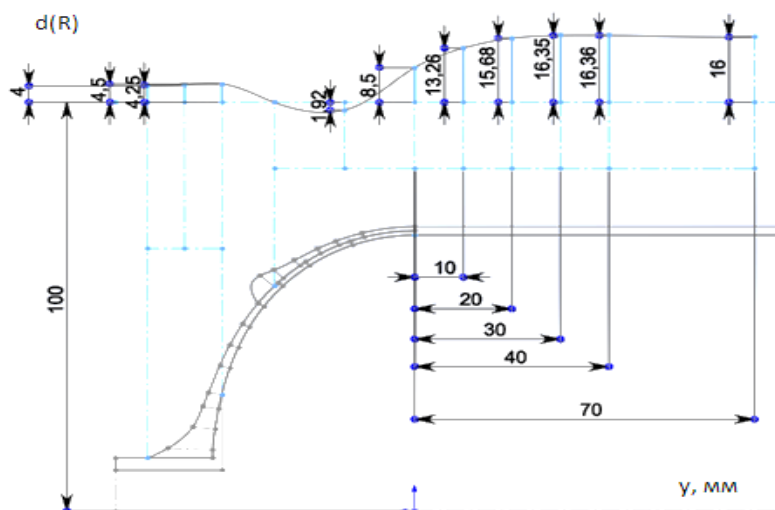


Рисунок 9. Распределение значений деформации $d(R)$ по днищу и центральной части малогабаритного корпуса

Таблица 2. Масса композитного слоя при изменяемых зонах намотки днища для диаметра лейнера 101 мм

Диаметр 101 мм	Количество зон	Лейнер	Слой [0]	Слой [90]	Масса
	1		273,4		
Объем, см ³	2	50,6	248,4	58,7	
	3		239,1		
	1		546,9		1062,1
Масса, г	2	397,8	496,8	117,4	1012,0
	3		478,3		993,6

Таблица 3. Масса композитного слоя при изменяемых зонах намотки днища для диаметра лейнера 135 мм

Диаметр 135 мм	Количество зон	Лейнер	Слой [0]	Слой [90]	масса
	1		1308,8		
Объем, см ³	2	278,2	1092,9	149,3	
	3		1020,5		
	1		2617,6		5100,2
Масса, г	2	2183,8	2185,8	298,7	4668,4
	3		2041,0		4523,6

По значениям, приведенным в табл. 2, 3 видно, что с переходом на двузонную намотку днища малогабаритного корпуса масса используемого при намотке композитного материала снижается.

Особенность применения многозонной намотки явно выражено при проектировании и изготовлении малогабаритных баллонов высокого давления, где в качестве лайнера используется оболочка, изготовленная из пластика, при намотке которого снижение веса наматываемых композиционных материалов играет большую роль.

4. Заключение

1. Исследовано влияние зонной структуры намотки композитным материалом на деформационные свойства малогабаритных корпусов.

2. При исследовании напряжений от степени комбинирования намотки зонами показало, что параметры напряжений достигают максимальных значений в зоне перехода от днища к цилиндрической части малогабаритного корпуса и эти параметры можно регулировать намоткой.

3. Намотка малогабаритных корпусов двумя зонами позволило получить равномерное распределение значений деформации в переходной части между днищем и центральной частью малогабаритного корпуса, при этом критерий массового совершенства малогабаритного корпуса увеличился в 1,5 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рач, В. А. Влияние характеристик лентоформирующих трактов намоточных станков на конструкционную прочность волокон в малогабаритных оболочках / В. А. Рач // Механика композиционных материалов. – 1991. – №1. – С. 143-148.

2. Фрегер, Г. Е. Основы механики и технологии композиционных материалов: Учебное пособие / Г. Е. Фрегер, М. Д. Аптекарь, Б. Б. Игнатъев, В. В. Чесноков, А. Х. Меликбеян, В. А. Коструб. – К.: Аристей, 2004. – 524 с.

3. Маринин, В. И. Моделирование структуры изделия намотки // «Композиционные материалы в промышленности» материалы двадцать шестой международной конференции и выставки 29 мая, 2 июня 2006 г., г. Ялта, Крым.

4. Игуменов, М. С. Разработка технологии изготовления гибридного сосуда высокого давления методом ротационного формования и линейного полиэтилена с применением армирования: дис. ... канд. техн. наук / М. С. Игуменов; Санкт-Петербургский государственный технологический институт. – Санкт-Петербург: 2015. – 145 с.

5. Васильев, В. В. Оптимальное проектирование слоистых композитов. // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2009. – Т.15. – №1. – С. 3-16.

Поступила в редколлегию 11.01.2019 г.