

РАСЧЕТ КОМПОЗИТНЫХ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ, КОМБИНИРОВАННЫХ СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ И РЕЗЕРВУАРОВ

Голушко К.С.
Институт вычислительных технологий СО РАН,
г. Новосибирск

Конструкции, содержащие тонкостенные элементы, используются в различных областях человеческой деятельности. Тонкостенные оболочки занимают ведущую роль в авиационной и ракетно-космической технике, судо- и автомобилестроении, энергетическом и химическом машиностроении, жилищном и промышленном строительстве. В свою очередь, композиционные материалы (КМ) характеризуются уникальным разнообразием и сочетанием важных физико-химических и механических свойств. Конструкции из КМ легкие, с высокой удельной прочностью, устойчивы к коррозии и старению. Все это значительно облегчает их изготовление, транспортировку, монтаж и эксплуатацию.

Постановка задачи.

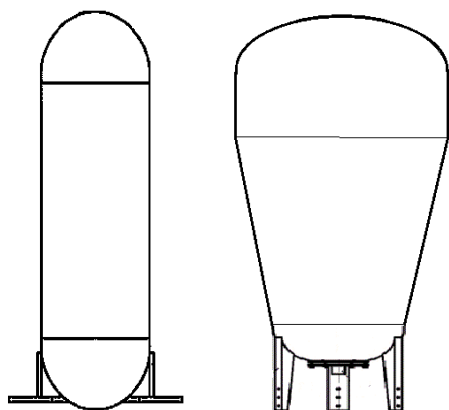


Рис.1. Сосуды давления и резервуары

Рассматриваются комбинированные сосуды давления (резервуары), изготовленные из волокнистых композиционных материалов, образованные сопряжением оболочек нулевой гауссовой кривизны с оболочками, образованными вращением кривых второго порядка (в частном случае, сопряжением цилиндрической оболочки с полусферическими днищами). Сосуды находятся под действием постоянного внутреннего давления P . Требуется рассчитать напряженно-деформированное состояние оболочечной конструкции, проанализировать зависимость поведения конструкции от

структурных параметров композитного материала, определить наиболее предпочтительные параметры армирования, исходя из критерия прочности конструкции.

Исходные системы уравнений. При моделировании поведения многослойных комбинированных сосудов давления использовались различные системы дифференциальных уравнений, основанные на гипотезах Кирхгофа-Лява [1], Тимошенко [2], Андреева-Немировского [3]. В рамках теории Кирхгофа-Лява влияние поперечных сдвигов не учитывается. При таком подходе порядок разрешающей системы дифференциальных уравнений не зависит от количества слоев и равен 8. При использовании теории Тимошенко отсутствует возможность учета сдвигов отдельно для каждого слоя, а порядок разрешающей системы дифференциальных уравнений равен 10. В рамках теории Андреева-Немировского учитываются поперечные сдвиги в каждом слое, порядок разрешающей системы дифференциальных уравнений не зависит от количества слоев и равен 12.

Исходные системы уравнений, состоящие из уравнений равновесия, кинематических соотношений и соотношений упругости, выписаны в [4]. При моделировании физико-механических характеристик КМ использовался структурный подход, в рамках которого механические характеристики композиции армированной

среды выражаются через механические характеристики связующего и армирующего материалов и через параметры армирования.

Коническая оболочка. Для конической оболочки сравнивались нагрузки начального разрушения при изменении ее геометрических параметров. В таблице 1 приведены безразмерные нагрузки начального разрушения жестко заземленной углепластиковой усеченной конической оболочки, нагруженной равномерным внутренним давлением, и отличие между результатами, полученными по различным теориям. Здесь: L - длина оболочки, h - толщина оболочки. Относительная разность между решениями, полученными по теории Кирхгофа-Лява и уточненными теориями: $\max_{r,h,\psi} |f_{к.л.} - f_{теория}| / \max_{r,h,\psi} (f_{теория})$.

Таблица 1

Параметр, L/h	Теория Кирхгофа-Лява	Теория Тимошенко	Теория Андреева-Немировского	Δ %, К.-Л. и Тимошенко	Δ %, К.-Л. и Андреева-Немировского
20	25.169	31.841	15.283	20.95%	64.68%
40	11.608	13.133	7.592	11.61%	52.89%
80	5.497	5.853	3.888	6.08%	41.38%
100	4.338	4.562	3.145	4.91%	37.93%

Из результатов расчетов следует, что чем длиннее и тоньше коническая оболочка, тем меньше отличие между результатами, полученными по различным теориям. Наименьший уровень нагрузок начального разрушения получен в рамках теории Андреева-Немировского. То есть использование более простых теорий может привести к существенной переоценке несущей способности конструкции. Переоценка будет тем больше, чем короче и толще оболочка.

Цилиндрическая оболочка. На рис. 2 представлены зависимости максимальных приведенных интенсивностей напряжений в элементах композита для трехслойной цилиндрической углепластиковой оболочки от угла спирального армирования и соотношения толщин армированных слоев $\bar{h}_1 = h_1/h$. Внутренний слой оболочки толщины h_1 армирован окружным семейством арматуры, средний слой толщины h_2 - спиральными семействами под углами ψ и $-\psi$, а внешний слой толщины h_3 - продольным семейством арматуры. Обозначим такую структуру армирования $(\psi, -\psi, 0)$. $P=40$ Атм. Расчеты проводились по теории Андреева-Немировского [3] и модели КМ с двумерными волокнами [6].

Из рис. 2 видно, что при углах армирования меньших 30° и небольшой толщине внутреннего и внешнего слоев напряжения в арматуре резко увеличиваются. Однако, существует достаточно широкая область параметров, при которых интенсивности напряжений в элементах композита уменьшаются от 3 до 8 раз.

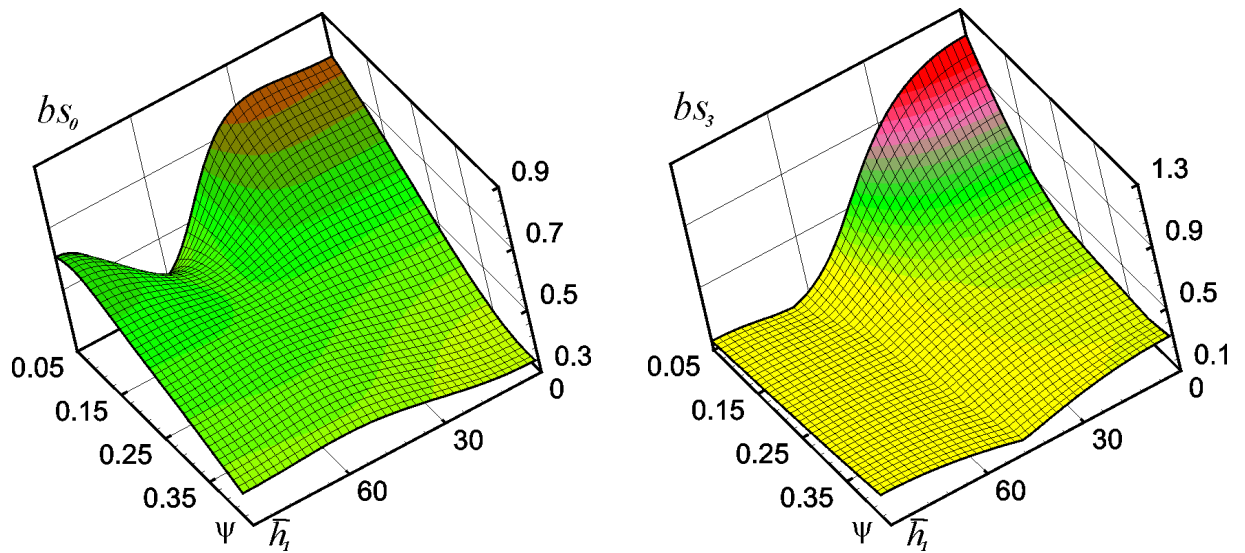


Рис. 2

Из рис. 2 так же следует, что при $\psi \leq 30^\circ$ и $\bar{h}_l \leq 0.15$ начальное разрушение происходит в спиральной арматуре, а при $\psi \geq 60^\circ$, тех же толщинах слоев и дальнейшем увеличении нагрузки - в связующем.

Эллипсоидальная оболочка. На рис. 3 представлены зависимости максимальных приведенных интенсивностей напряжений в связующем материале bs_0 для эллипсоидальной углепластиковой оболочки (рис. 3а) и эллипсоидальной оболочки с алюминиевой матрицей и стальными волокнами (рис. 3б).

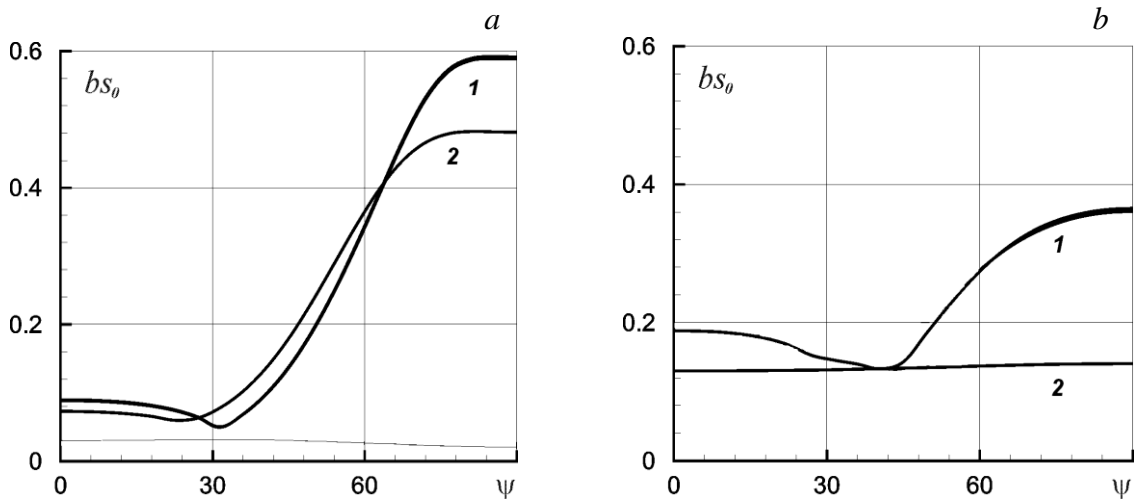


Рис.3

Результаты получены при использовании теории Кирхгофа-Лява. Здесь кривым 1 соответствуют результаты, полученные при использовании модели КМ с одномерными волокнами [5], кривым 2 – по модели КМ с двумерными волокнами.

Из рис. 3а видно, что при уменьшении угла спирального армирования интенсивности напряжений в связующем материале углепластиковой оболочки уменьшаются в 5 раз. В случае металлокомпозитной оболочки зависимость bs_0 от

структуры армирования не столь ярко выражена. При значениях ψ близких к 40° значения интенсивностей напряжений в элементах композита принимают минимальное значение. Стоит отметить, что интенсивностей напряжений в элементах композита, полученные при использовании модели КМ с одномерными волокнами, больше аналогичных величин, полученных при использовании модели КМ с двумерными волокнами, тем самым подтверждается правомерность использования модели КМ с одномерными волокнами, т.к. она дает оценку прочности оболочки «сверху», с «запасом».

Цилиндрический сосуд давления. Исследовано влияние структуры армирования на уровень напряжений и деформаций в углепластиковом цилиндрическом сосуде давления, гладко сопряженном с полусферическими днищами, находящегося под действием постоянного внутреннего давления P . $E_a = 300 \text{e}9 \text{ Па}$, $E_c = 3 \text{e}9 \text{ Па}$, $\sigma_a^* = 3 \text{e}9 \text{ Па}$, $\sigma_c^* = 90 \text{e}6 \text{ Па}$, $P = 100000 \text{ Па}$. На рис.4 показаны максимальные приведенные интенсивности напряжений в связующем материале bs_c и арматуре bs_a в зависимости от угла спирального армирования ψ . Результаты получены на основе классической теории Кирхгофа-Лява и модели КМ с двумерными волокнами. Зафиксировав интенсивность армирования по толщине $\omega_z = 0.8$, варьируем значение интенсивности армирования в армирующем слое ω_a , таким образом, изменяя объемное содержание арматуры.

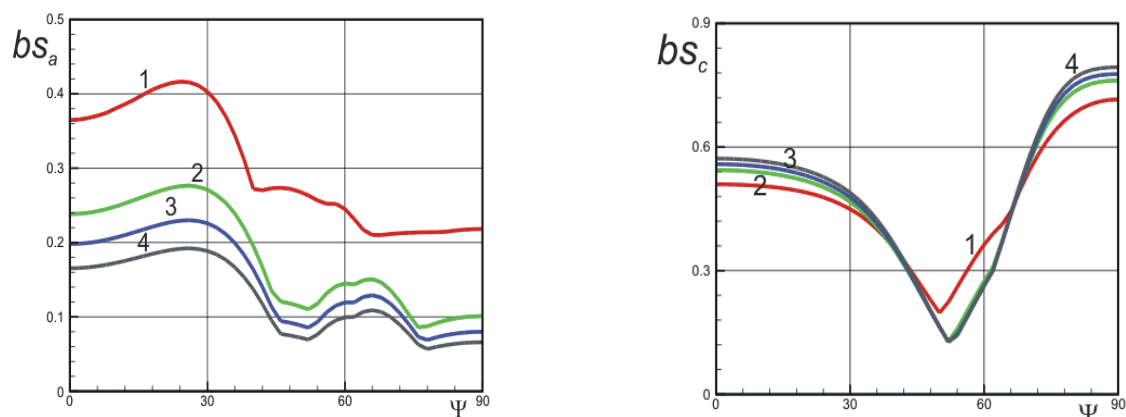


Рис. 4

Линиям 1-4 соответствуют результаты, полученные при значениях $\omega_a = 0.1, 0.3, 0.4, 0.5$ соответственно.

Из рис.4 видно, при $\omega_a = 0.1$ арматура перегружена, а различие между результатами, полученными при значениях $\omega_a = 0.3, 0.4, 0.5$, не превышает 30% для арматуры, а для связующего они практически не различимы для всей области изменения параметра ψ . Таким образом, не всегда целесообразно армировать материал интенсивнее, затрачивая большее количество дорогостоящих материалов, ведь как следует из полученных результатов, в данном случае можно получить практически тот же запас прочности конструкции и при меньшем количестве арматуры в армирующем слое. Отметим, что при значениях ψ близких к 55° значения интенсивностей напряжений в элементах композита принимают минимальное значение.

Теперь, при тех же исходных данных, рассмотрим случай, когда параметры ω_a и ω_z зависимы. Так происходит, например, в случае технологического процесса непрерывной намотки волокнами постоянного поперечного сечения. Фиксируя объемное содержание арматуры $\omega_a \omega_z = 0.5$, варьируем соотношение между величинами ω_a и ω_z .

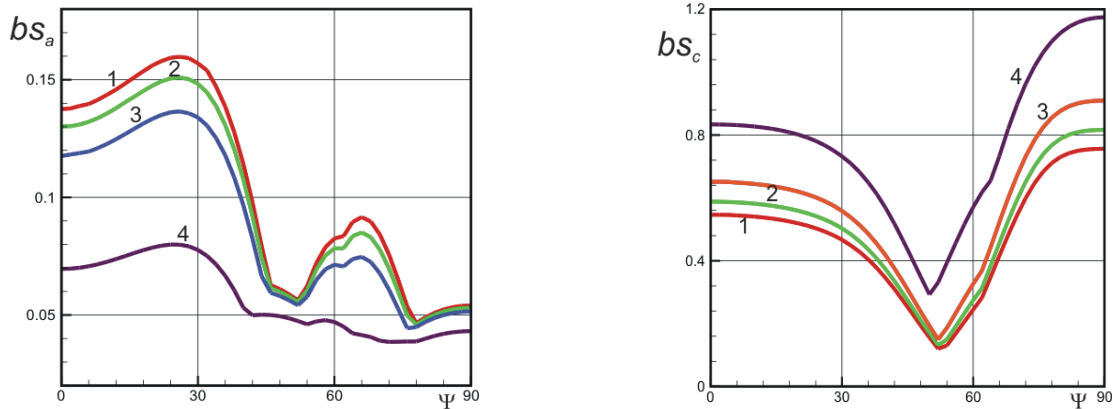


Рис. 5

Кривым 1-4 соответствуют результаты, полученные при значениях $\omega_a = 0.55, \omega_z = 0.9$, $\omega_a = 0.55, \omega_z = 0.9$, $\omega_a = 0.55, \omega_z = 0.9$, а также $\omega_a = 0.7, \omega_z = 0.7$ и $\omega_a = 0.9, \omega_z = 0.55$ соответственно.

Как следует из рис. 5, высокие интенсивности армирования в армирующем слое приводят к сильной нагруженности связующего материала. Однако соответствующим подбором структурных параметров возможно влиять на вид НДС конструкции при сохранении общего объемного содержания армирующих волокон.

На примере цилиндрического сосуда давления, гладко сопряженного с полусферическими днищами, исследуем влияние механических параметров КМ на оценку уровня напряжений и деформаций. На рис. 6 линиям 1-3 соответствуют интенсивности напряжений, рассчитанные для углепластиковой, стеклопластиковой и алюминиевой со стальными волокнами конструкции соответственно. Модули Юнга материалов наполнителя и матриц соответственно равны: $E_a^1 = 363e9$ Па, $E_a^2 = 90e9$ Па, $E_a^3 = 200e9$ Па, $E_c^1 = E_c^2 = 3e9$ Па, $E_c^3 = 70e9$ Па.

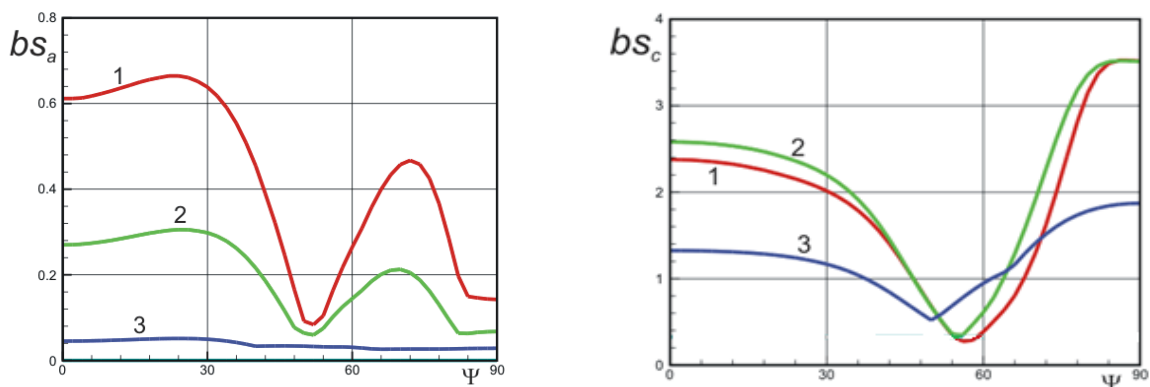


Рис.6

Видно, чем больше различие между механическими характеристиками материалов связующего и арматуры, тем больше влияние структурных параметров композита. Самое большое влияние достигается для углепластика – до 7 раз, для стеклопластика – до 5 раз, для металлокомпозита – до 3 раз.

Изотропный резервуар. На примере однослойного изотропного резервуара, заполненного жидкостью, проведено сравнение оболочечных моделей с трехмерными конечно-элементными моделями (ANSYS). В первом случае резервуар жестко зашпемлен снизу, сверху край свободный (рис.7), во втором – резервуар жестко зашпемлен снизу и сверху (рис.8).

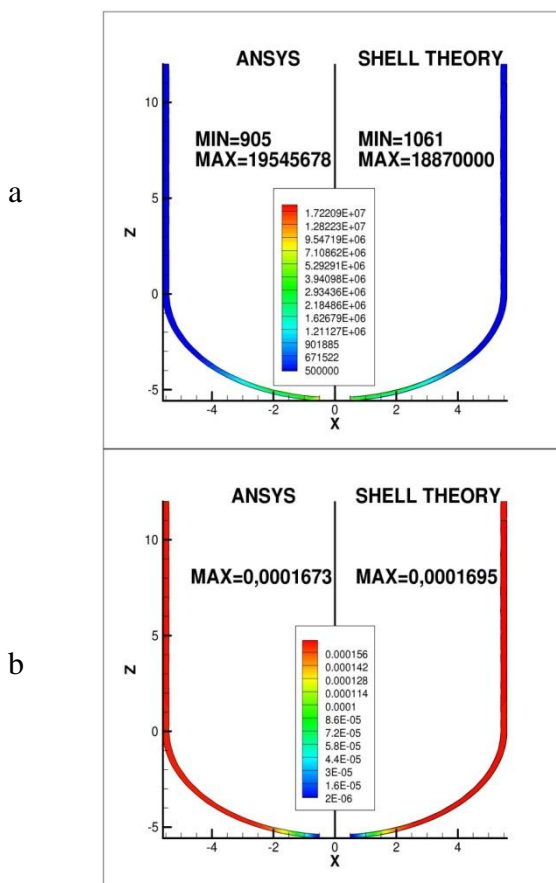


Рис.7

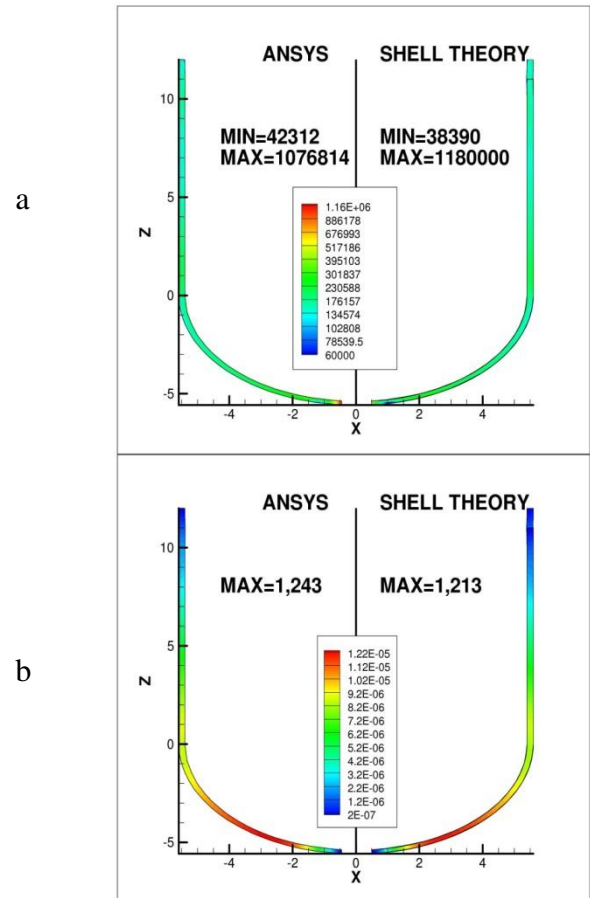


Рис.8

Здесь левые половины графиков соответствуют результатам, полученным с помощью ANSYS, правые – с помощью оболочечной теории. На рис. 7а и 8а z-максимальные приведенные значения интенсивностей напряжений, на рис.7б и 8б - величина вектора перемещений.

Отличие расчетных значений для максимумов напряжений не превышает 3%, для максимумов деформаций – 1% (рис.7). В случае жесткого зашпемления резервуара снизу и сверху эти же значения не превышают 9% и 2% соответственно (рис.8).

Литература

1. Новожилов В.В. Теория тонких оболочек. – Л.: Судпромгиз, 1951. – 344 с.
2. Григоренко Я.М., Василенко А.Т. Задачи статики анизотропных неоднородных оболочек. – М.: Наука, 1992. – 321 с.
3. Андреев А.Н., Немировский Ю.В. Многослойные анизотропные оболочки и пластины: Изгиб, устойчивость, колебания. - Новосибирск: Наука. 2001. - 288 с.
4. Голушко С.К., Немировский Ю.В. Прямые и обратные задачи механики упругих композитных пластин и оболочек вращения. М.: Физматлит, 2008.
5. Немировский Ю.В. Об упруго-пластическом поведении армированного слоя //Журн. прикл. механики и техн. физики. 1969. №6. С. 81-89.
6. Немировский Ю.В. К теории термоупругого изгиба армированных оболочек и пластин // Механика полимеров. 1972. № 5. С. 861-873.