

УДК 534-16

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОТВЕРСТИЙ НА СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ СЕТЧАТЫХ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ*

А. А. СКЛЕЗНЕВ

*ФГБОУ ВПО «МАТИ – Российский государственный
технологический университет имени К. Э. Циолковского»,
г. Москва*

Сетчатые композитные конструкции, разработанные в Центральном научно-исследовательском институте специального машиностроения (ЦНИИСМ) около 30 лет назад [1], состоящие из семейств спиральных, кольцевых и продольных ребер, образованных методом непрерывной намотки, обладают широким спектром конструктивных достоинств, из которых наиболее важными являются: высокое весовое совершенство и сравнительно невысокая стоимость изготовления по отношению к традиционным металлическим или композитным конструкциям типа подкрепленных оболочек или слоистых структур. Кроме этого сетчатые композитные конструкции имеют высокую несущую способность и жесткость. Наметившиеся в последние годы в мировом авиапроме тенденции ко все большему использованию композитных материалов в конструкции планера и других элементов самолетов приводят к необходимости применять инновационные структуры взамен использовавшихся до недавнего времени.

За последние 15 лет сетчатые композитные конструкции широко использовались в качестве корпусов космических аппаратов [1], [3], однако их использование в качестве элементов гражданских летательных аппаратов еще недостаточно широко. На рис. 1 показаны этапы роста применимости композиционных материалов (КМ) в конструкциях гражданских самолетов.

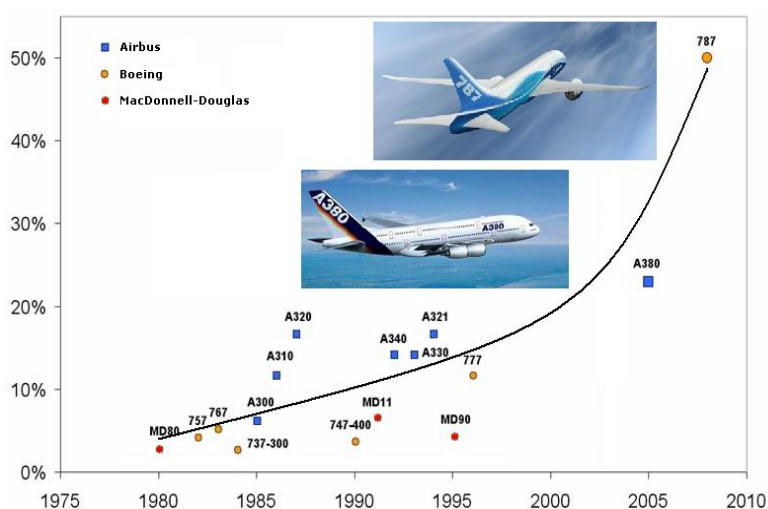


Рис. 1. Динамика роста объема применения композитных материалов в конструкции планера пассажирского самолета

* Пленарный доклад на IX Международной научно-технической конференции (научные чтения, посвященные П. О. Сухому) «Современные проблемы машиноведения», Гомель, 25–26 октября 2012 г.

Специфической особенностью фюзеляжей самолетов является наличие технологических отверстий в конструкции: окон, дверей и т. п. (на рис. 2, а, б можно видеть примеры фюзеляжей самолетов, выполненных в виде конструкций из КМ). Однако влияние таких вырезов на динамическое поведение сетчатых композитных конструкций, величины продольных и поперечных собственных частот мало исследовано, чему и посвящена настоящая работа.



а)

б)

Рис. 2. Секция фюзеляжа: а – Boeing 787; б – ИЛ-114

В процессе исследования динамического поведения композитных конструкций в работе проведены численные эксперименты для выявления возможного влияния вырезов в цилиндрических композитных сетчатых оболочках вращения на величины собственных продольных и изгибных частот.

В качестве исходной оболочки, не имеющей вырезов, рассмотрим цилиндрическую оболочку, общий вид которой представлен на рис. 3. Сетчатая конструкция является интегральной, соединение ребер между собой, а также с обшивкой и торцевыми шпангоутами осуществляется в процессе полимеризации связующего композитного материала и не требует дополнительных элементов. Это определяет высокую экономическую эффективность сетчатых композитных конструкций, изготовление которых не требует традиционных для современного самолетостроения сборочных операций.



Рис. 3. Цилиндрическая сетчатая композитная оболочка

Как известно [2], геодезические сетчатые конструкции, не имеющие вырезов в расчетах, в соответствии с континуальной моделью расчета, могут быть заменены на некоторые эквивалентные оболочки с условно сплошным слоем, и имеющие некоторые эффективные жесткости, характеризующие их поведение, которые рассчитываются исходя из геометрических параметров геодезической конструкции. На рис. 4 приведены основные геометрические параметры сетчатой оболочки.

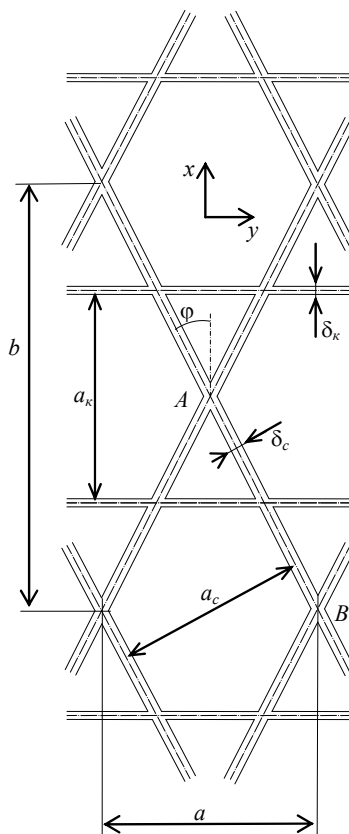


Рис. 4. Геометрические параметры сетчатой оболочки

Однако для оболочек, имеющих вырезы, континуальная модель в своем первоначальном виде не может применяться, в связи с чем в данной работе основным методом вычислений выбран численный расчет методом конечного элемента (МКЭ). В качестве основной модели принята оболочка, представленная на рис. 5.

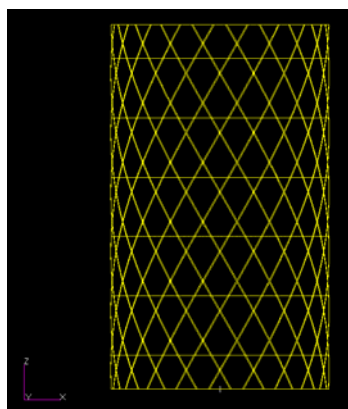


Рис. 5. Модель 1. Цилиндрическая сетчатая композитная оболочка вращения, вырезы отсутствуют

Данная оболочка имеет консольное закрепление на нижнем торце, в расчетах возможно моделирование прикрепленных сосредоточенных масс на втором, свободном торце, а также в любом сечении оболочки, перпендикулярном образующей оболочки. Модель (рис. 5) состоит из семейств спиральных и кольцевых ребер и имеет следующие характеристики:

$$L = 2,1 \text{ м}, R = 0,7 \text{ м}, E_c = E_k = 180 \text{ ГПа}, \rho_c = \rho_k = 1500 \text{ кг/м}^3,$$

$$h_c = h_k = 15 \text{ мм}, \varphi_c = 30^\circ, \delta_c/a_c = 0,04044, \delta_k/a_k = 0,01333.$$

Для проведения численных экспериментов использовался программный комплекс MSC Nastran/Patran, геометрия модели формировалась в программном комплексе SolidWorks.

Моделирование элементов ребер в оболочке осуществлялось при помощи балочных элементов, позволяющих в полной мере учитывать возникающие в ребрах изгибные напряжения, оказывающие в некоторых случаях значительное влияние на поведение сетчатых композитных конструкций.

Для рассматриваемой модели оболочки без вырезов было проведено сравнительное вычисление собственных осевой и изгибных частот по континуальной модели расчета сетчатых оболочек вращения, результаты вычислений МКЭ/континуальная модель приведены в табл. 1.

Таблица 1

Первые осевая и изгибная собственные частоты

Показатель	Метод конечного элемента	Континуальная модель
Осевая частота, Гц	507,2	486,15 (-4,15 %)
Изгибная частота, Гц	203,5	207,65 (+2 %)

Как видно из табл. 1, результаты расчета частот близки, разница составляет 2–4 %, что позволяет сделать вывод о верности собранной конечно-элементной модели оболочки. Превышение в большую сторону на 2 % значения изгибной частоты, по-видимому, связано с малым количеством пар спиральных ребер (20 – для оболочки, представленной на рис. 5) в исследуемой модели. «Сетка» ребер получается сравнительно «редкой» по сравнению с изготавливаемыми серийно образцами конструкций (рис. 3). Такая модель была выбрана только для ускорения процесса ее моделирования в среде МКЭ. Очевидно, что одна и та же континуальная модель сетчатой конструкции обычно соответствует множеству эквивалентных по отношению к континуальному решению частных моделей, созданных в МКЭ, и отличающихся «частотой сетки ребер». Это связано с тем, что в континуальной модели для расчетов использованы безразмерные относительные параметры δ_c/a_c и δ_k/a_k . Как представляется, при увеличении числа семейств спиральных ребер различия в результатах, полученных при помощи МКЭ и континуальной модели расчета, будут нивелироваться.

Далее были рассмотрены модели 2–6 (рис. 6) и получены для них величины собственных продольных и изгибных частот при помощи МКЭ.

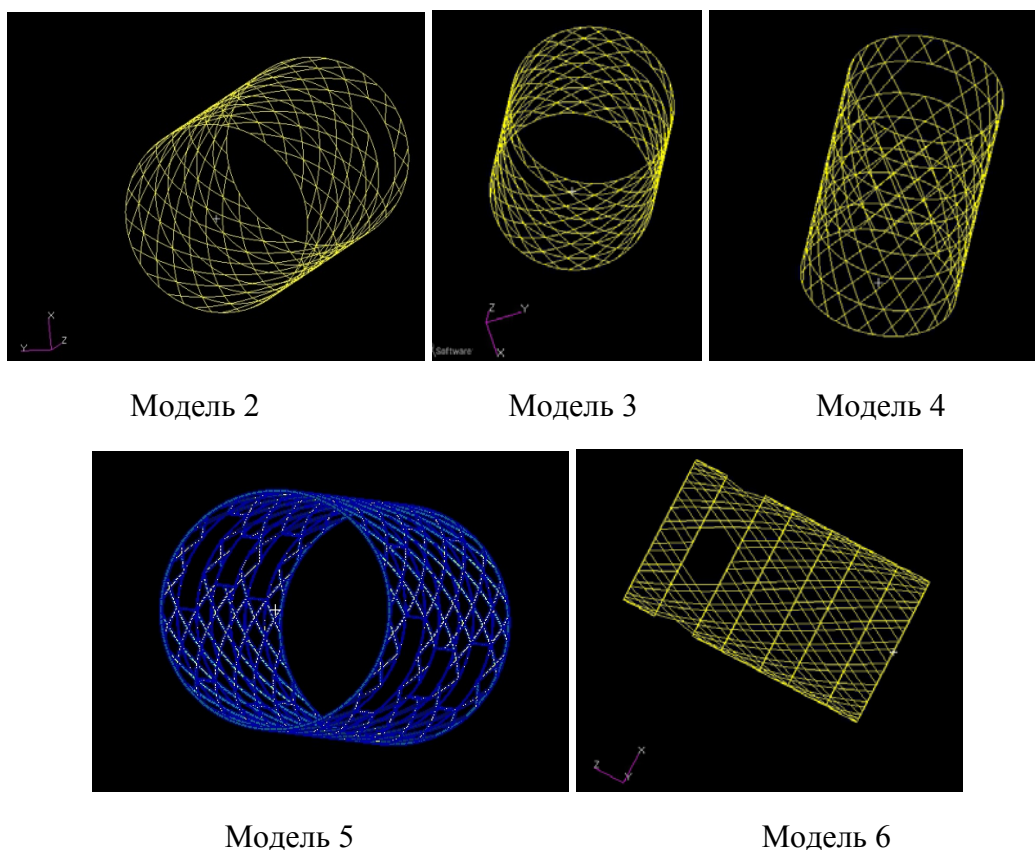


Рис. 6

Модель 2 представляет собой модель 1 с одним вырезом, расположенным на расстоянии $1/7$ длины оболочки l от свободного торца, длиной $2/7 l$ и шириной $1/7 l$.

Модель 3 представляет собой два симметричных выреза с геометрическими характеристиками и расположением, как у модели 2.

Модель 4 представляет собой шесть симметрично расположенных вырезов, по три в линию с каждой стороны оболочки, расположенных на расстоянии $1/7$ длины оболочки l от свободного торца с шагом в $1/7 l$, длиной $1/7 l$ и шириной $1/7 l$.

Модель 5 представляет собой четыре симметрично расположенных выреза в одном сечении оболочки на расстоянии $1/7$ длины оболочки l от свободного торца, длиной $1/7 l$ и шириной $1/7 l$.

Модель 6 представляет собой модель 1 с одним вырезом, расположенным на расстоянии $1/7$ длины оболочки l от свободного торца, длиной $1/7 l$ и шириной $1/7 l$.

В результате численного расчета в программном комплексе Patran/Nastran были получены следующие значения первых собственных продольных и изгибных частот (табл. 2).

Таблица 2

Номер модели	Без продольных ребер	
	1-я продольная частота	1-я поперечная частота
ЗАДЕЛКА С ОДНОЙ СТОРОНЫ (без неконструкционных масс)		
2-я модель	521	157,05
3-я модель	502,18	143,3
4-я модель	448,5	85,47
5-я модель	511,1	185,9
6-я модель	503,2	192,3

После этого были изменены граничные условия модели и рассмотрена оболочка, имеющая жесткую заделку по обоим торцам, в расчетах были использованы те же модели, что были представлены на рис. 2 (результаты вычислений представлены в табл. 3); оболочка, имеющая продольные ребра, совпадающие с границами отверстий, при условии жесткой заделки с одной стороны и втором свободном торце (результаты вычислений представлены в табл. 4), а также задача с моделями 1–6, имеющими прикрепленную на свободном торце массу величиной 3 т (результаты вычислений представлены в табл. 5).

Таблица 3

Номер модели	Без продольных ребер	
	1-я продольная частота	1-я поперечная частота
ЗАДЕЛКА С ДВУХ СТОРОН (без неконструкционных масс)		
1-я модель	995	614,3
2-я модель	1785	585,3
3-я модель	1746	443,4
4-я модель	1651	396,2
5-я модель	1600,1	504,9
6-я модель	1278,1	594,3

Таблица 4

Номер модели	С продольными ребрами	
	1-я продольная частота	1-я поперечная частота
ЗАДЕЛКА С ОДНОЙ СТОРОНЫ (без неконструкционных масс)		
1-я модель	–	–
2-я модель	495,75	165,5
3-я модель	504,1	147,6
4-я модель	502,1	87,12
5-я модель	510,1	185,8
6-я модель	504,3	190,7

Таблица 5

Номер модели	Без продольных ребер	
	1 продольная частота	1 поперечная частота
ЗАДЕЛКА С ОДНОЙ СТОРОНЫ, с другой ПОДВЕШЕНА МАССА в 3 т (сосредоточенная масса имеет 6 степеней свободы)		
1-я модель	36,3	10,7
2-я модель	33,8	9,31
3-я модель	32,3	7,92
4-я модель	29,4	6,87
5-я модель	31,5	9,38
6-я модель	35,1	10,1

Краткий анализ полученных результатов численных расчетов

Результаты, полученные выше, не дают возможности построить явные зависимости изменения значений собственных частот сетчатых геодезических конструкций от количества или расположения вырезов. Результаты некоторых моделей практически не отличаются друг от друга, что дает основание предположить, что если площадь выреза (или вырезов) является величиной, меньшей чем 5 % от общей площади поверхности сетчатой оболочки, представленной в виде непрерывной тонкостенной

оболочки с характерными для модели 1 длиной и радиусом (сравнительной оболочки), то этот вырез (или вырезы) практически не влияет на значения собственных частот и их наличие может не учитываться при проведении проектировочных расчетов сетчатых конструкций, что значительно сократит время на их предварительное проектирование, позволяя использовать континуальную модель расчета. Для случаев, когда общая площадь вырезов превышает 5 % от площади поверхности сравнительной оболочки, предлагается использовать методика, приведенную ниже.

Об одной приближенной методике расчета сетчатых геодезических конструкций, имеющих вырезы или отверстия

Рассмотрим модель 4, описанную выше. Представим данную модель в виде сетчатой композитной оболочки, состоящей из секций-сегментов 1-2-3-4-5-6-7, соединенных между собой и имеющих собственные эффективные жесткости, и/или прикрепленные массы, данный подход подробно описан в [3].

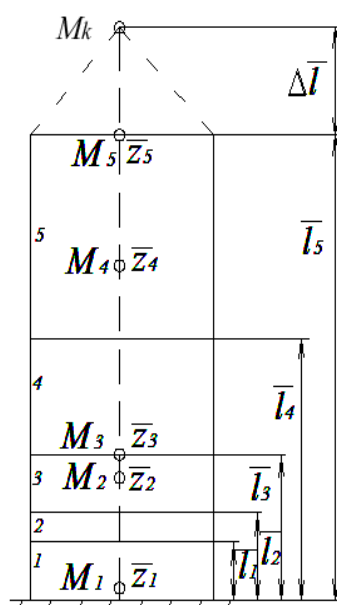


Рис. 7. Сетчатая оболочка, разбитая на отдельные сегменты

Рассматривая данную модель, будем считать, что для сегментов, не имеющих вырезов, будет применяться обычный расчет эффективных жесткостей, традиционный для континуальной модели, а для сегментов, имеющих вырезы, введем некоторые поправочные коэффициенты.

Попробуем уменьшить жесткость этих секций оболочки пропорционально площади вырезов. Методом подбора были получены следующие выражения для расчета:

– для осевых частот коэффициент поправки запишем в виде:

$$K_1 = 1 - 4S_s^i / n_{\text{отв в сечении}};$$

– для изгибных частот коэффициент поправки выглядит:

$$K_2 = S_i / C_{\text{coef of symmetry}}$$

где S_s^i – отношение площади отверстий в сегменте к площади сегмента, %; S_i – отношение площади всех отверстий к площади всей сравнительной оболочки; $C_{\text{coef of symmetry}}$ – вводится подбором.

Пробные результаты общих расчетов сравнительно с результатами, полученными при решении численного эксперимента в МКЭ, представлены в табл. 6.

Таблица 6

Номер модели	Без продольных ребер							
	1-я продольная частота		1-я поперечная частота		1-я продольная частота		1-я поперечная частота	
	МКЭ	Конт. мод.	МКЭ	Конт. мод.	МКЭ	Конт. мод.	МКЭ	Конт. мод.
	ЗАДЕЛКА С ОДНОЙ СТОРОНЫ (без неконструкционных масс)				ЗАДЕЛКА С ОДНОЙ СТОРОНЫ, с другой ПОДВЕШЕНА МАССА в 3 т (сосредоточенная масса имеет 6 степеней свободы)			
2-я модель	521	474,67	157,05	147,43	33,8	30,79	9,31	10,11
3-я модель	502,18	474,67	143,3	147,34	32,3	30,79	7,92	10,10
4-я модель	448,5	434	85,47	86,82	29,4	27,37	6,87	8,76
5-я модель	511,1	481,76	185,9	177,25	31,5	30,87	9,38	10,10
6-я модель	503,2	481,75	192,3	176,78	35,1	30,87	10,1	10,11

В качестве основных выводов, полученных в результате работы, можно отметить следующие:

- При общей площади технологических отверстий меньшей, чем 5 % от общей площади сетчатого элемента конструкции, наличием технологических отверстий в целях упрощения проектировочных расчетов можно пренебречь.

- Площадь вырезов, превышающая 5 % от общей площади конструкции, может оказывать значительное влияние на значения собственных частот, понижая, в некоторых случаях, их в разы, расчет необходимо проводить на основе точной модели конструкции при помощи пакетов расчета на основе МКЭ.

- Модифицированная континуальная модель позволяет оценивать величины собственных частот конструкции с погрешностью, пригодной для использования в проектировочных расчетах новых конструкций.

Литература

1. Vasiliev, V. Anisogrid lattice structures – survey of development and application, Composite Structures, 54 / V. Vasiliev, V. Barynin, F. Razin, 2001. – P. 361–370.
2. Васильев, В. В. Механика конструкций из композиционных материалов / В. В. Васильев. – М. : Машиностроение, 1988. – 288 с.
3. Склезнев, А. А. Прикладной метод определения собственных частот колебаний сетчатых композитных конструкций космических аппаратов / А. А. Склезнев // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2010. – Т. 16, № 2. – С. 241–251.

Получено 02.11.2012 г.