

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАМОТКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ МАЛОГАБАРИТНЫХ КОРПУСОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Важным этапом в моделировании многослойных конструкций летательных аппаратов (ЛА), изготавливаемых методом намотки из волокнистых композиционных материалов, является разработка математической модели процесса армирования путем укладки композиционной ленты на поверхность оправки, на основе чего оценивается возможность реализации конкретной схемы армирования и получения требуемых свойств изделия. От точности разработки этой модели во многом зависят точность расчета параметров процесса намотки, расчет управляющей программы для намоточного оборудования с ЧПУ.

В настоящее время существует три метода расчета армированных многослойных оболочек из волокнистых композиционных материалов (КМ): первый метод основан на традиционных способах расчета конструкций из изотропных материалов, во втором методе связующее вещество не является несущим элементом конструкции, вследствие чего армированная оболочка рассматривается как нитевая оболочка. В третьем методе рассматривается "ленточная" модель, основанная на том предположении, что геометрические характеристики поверхности и параметры армирования в зависимости от внешней формы оправки изменяются в процессе намотки не только вдоль траектории армирования, но и по ширине ленты [1].

При моделировании технологического процесса намотки принимаем "нитяную" модель укладки армирующего материала и расчета параметров этого процесса [2]. На основе этой модели рассчитываются все параметры процесса намотки оболочки лентой конечной ширины для оправки, изготовленной по внутреннему контуру изделия. Для получения внешнего теоретического контура изделия (рис. 1) часто требуется коррекция формы, при которой теоретическая поверхность преобразовывается в поверхность оправки, что приводит к существенному возрастанию объема перерабатываемой информации.

Этот недостаток устраняется посредством объемного моделирования укладки ленты, учитывающей изменения геометрических характеристик различных нитей, волокон ленты при их укладке на поверхность армирования в различных слоях многослойной конструкции и обеспечивающей получение требуемой внешней формы.

Целью данной работы является моделирование намотки сложнопрофильных осесимметричных малогабаритных корпусов ЛА из полимерных композитных материалов (ПКМ).

Поверхность объёмной модели (рис. 2) представляет собой оболочку, состоящую из изотензоидных днищ, цилиндрической и конической частей.

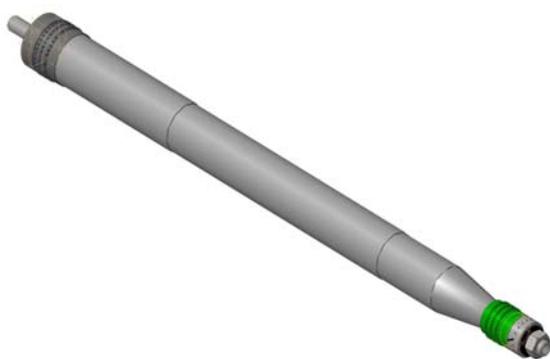


Рисунок 1 – Изделие

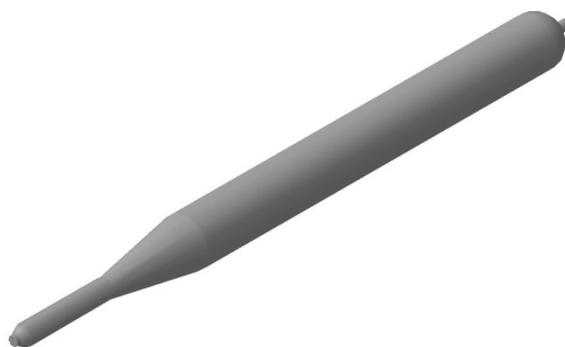


Рисунок 2 – Объёмная модель

При укладке одного цикла лента армирующего материала (АМ) может вернуться в точку «а» первоначального схода (рис. 3), при этом объёмная модель повернется на угол $360^\circ n$, где $n=0,1,2,3,4\dots$, или лента АМ может вернуться в точку «в», при этом объёмная модель дополнительно повернется (или не повернется) на угол $360^\circ/K$, где $K = 1,2,3,4\dots$. Число K определяет порядок симметрии текстурного слоя. Порядок симметрии текстурного слоя зависит от диаметра объёмной модели, её длины, угла армирования спирального слоя и угла охвата днища нитью при укладке её по геодезической кривой, т.е. порядок симметрии - величина произвольная, зависящая от конструктивных размеров наматываемой оболочки.

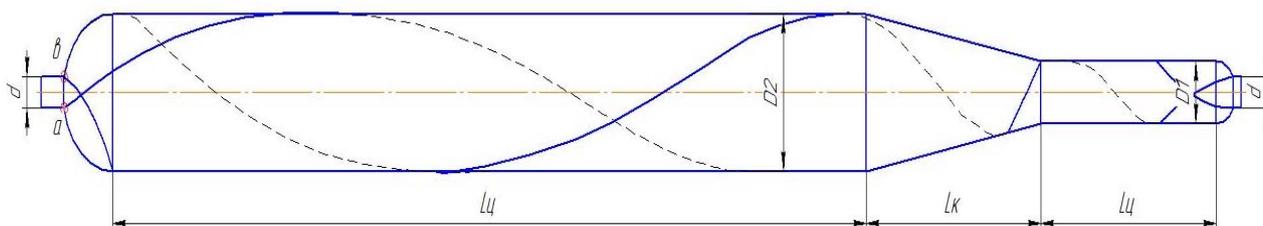


Рисунок 3 – Траектория укладки ленты армирующего материала

Особенность формирования текстурного слоя с различным порядком симметрии выражается в своеобразии получаемой слоистой структуры спирального слоя. При $K = 1$ лента, завершив полный цикл обмотки оправки, возвращается в точку своего первоначального схода. Для полной обмотки поверхности модели число циклов повторяется. При $K = 2$ лента, завершив полный цикл, не вернется в исходную точку, и будет сдвинута по отношению к ней на 180° . В исходную точку она вернется, совершив два цикла обмотки, при этом порядок симметрии текстурного

слоя показывает, сколько формируется винтовых текстурных поверхностей одновременно.

Полный геометрический угол поворота объёмной модели (Φ_e) состоит из угла поворота при укладке по двум днищам (Φ_1 и Φ_2), и угла поворота при укладке по конической (Φ_K) и по цилиндрическим поверхностям ($\Phi_{Ц_1}, \Phi_{Ц_2}$).

$$\Phi_e = 2(\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_K + \Phi_{Ц_1} + \Phi_{Ц_2}), \quad (1)$$

где 2 – коэффициент, учитывающий угол поворота объёмной модели в обратном направлении.

Намоточный угол поворота объёмной модели (Φ_H) из условия равномерной укладки лент по всей поверхности определяют так [3]:

$$\Phi_H = 360n \pm \frac{360^0}{k}. \quad (2)$$

Погрешность угла поворота, определяемая как $\Delta\Phi = |\Phi_e - \Phi_H|$ распределяется равномерно по участкам объёмной модели. При этом выполняем условие

$$\Phi_H = \Phi_e \pm |\Delta\Phi|. \quad (3)$$

Если погрешность $\Delta\Phi$ представляет собой величину, измеряемую десятками градусов, то необходимо изменить геометрические размеры объёмной модели и снова просчитать Φ_e , последовательно приближаясь к значению Φ_H [4].

Рассмотрим укладку нити по цилиндрической части объёмной модели длиной $l_{ц}$ и углом армирования спирального слоя к образующей φ (рис. 4).

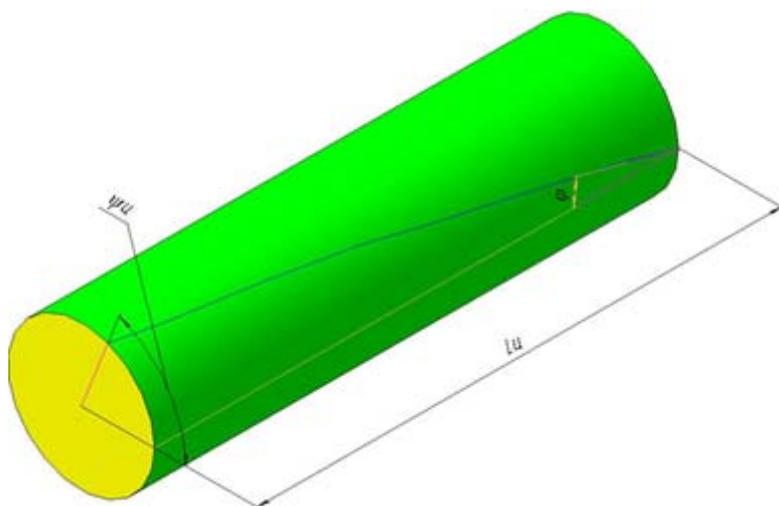


Рисунок 4 – Укладка нити по цилиндрической части объёмной модели

При укладке нити от точки «а» к точке «в» объёмная модель повернется на угол

$$\Phi_{\text{ц}} = \frac{360^\circ l_{\text{ц}} \operatorname{tg} \varphi}{\pi D}, \quad (4)$$

где $l_{\text{ц}}$ – длина цилиндрической части; D – диаметр цилиндра.

Рассмотрим конус и его развертку с геометрическими размерами, приведенный на рис. 5. При обмотке конической поверхности нить из условия устойчивости должна укладываться по геодезической линии (кривая 1-2, рис. 5, а). На развертке конической поверхности эта геодезическая линия представляет собой прямую 1-2 (рис. 5, б), уложенную под углом φ_2 к образующей в районе большого диаметра (D) и под углом φ_1 к образующей в районе малого диаметра (d).

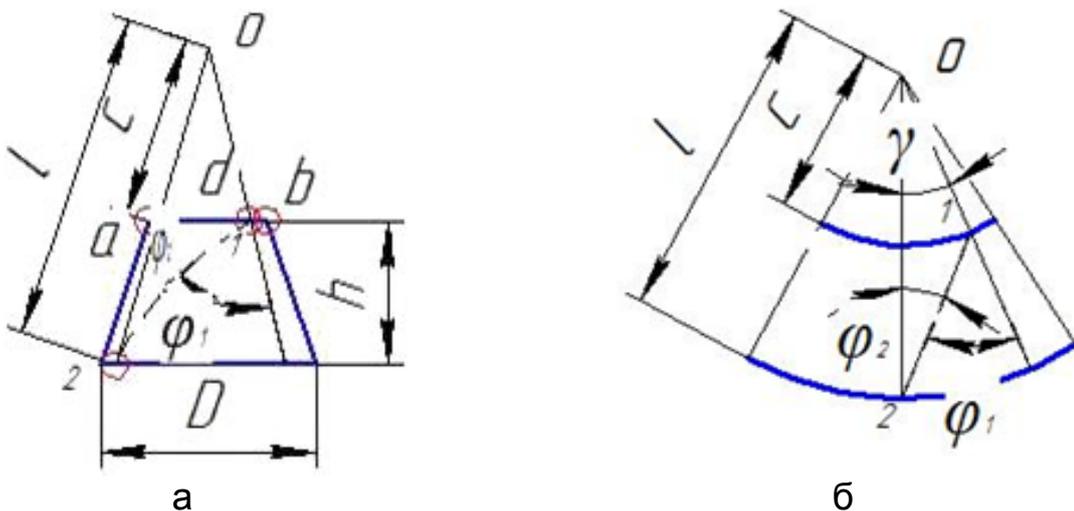


Рисунок 5 – Схема укладки нити на конической поверхности (штриховая линия – геодезическая траектория)

Рассматривая подобные треугольники (рис. 5) окончательно получаем равенство (5) представляющее собой известную теорему Клеро.

$$\sin \varphi_2 = \frac{d}{D} \sin \varphi_1. \quad (5)$$

Угол поворота конуса вокруг оси при укладке нити по его поверхности находим следующим образом. Из геометрического построения рис. 5, б получаем:

$$\gamma = \varphi_1 - \varphi_2, \quad (6)$$

Тогда точка окружности основания конуса при укладке нити по поверхности пройдёт путь $L = l\gamma$, при этом конус повернется на угол

$$\Phi_{\text{к}} = \frac{2l(\varphi_1 - \varphi_2)}{D}. \quad (7)$$

Заменяя l на более удобное обозначение параметров конической поверхности, получим

$$\Phi_K = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\sin \arctg\left(\frac{d_{i+1} - d_i}{2h_i}\right)}, \quad (8)$$

где φ_1, φ_2 – входной и выходной углы армирования; d, D – диаметры оснований усеченного конуса; h – высота усеченного конуса.

Образующая днища задаётся уравнениями, полученными из условия безмоментной нагрузки АМ. Тогда обмотку днища представляем как обмотку элементарных усеченных конусов. Выражение для расчёта угла поворота половины днища может быть представлено в виде

$$\Phi_{\text{дн}} = \frac{\varphi_i - \arcsin\left(\frac{d_i}{d_{i+1}} \sin \varphi_i\right)}{\sin \arctg\left(\frac{d_{i+1} - d_i}{2h_i}\right)}. \quad (9)$$

По полученным углам поворота $\Phi_{\text{дн}}, \Phi_K, \Phi_u$ наносим геодезическую кривую на поверхность объёмной модели.

Проектирование намоточных данных заключается в определении числа лент спирального слоя, количества слоев спирального слоя, шага намотки кольцевого слоя, количества слоёв кольцевого слоя.

Число лент спирального слоя определяем по соотношению [5]

$$k_L = \frac{h_c \pi \rho D \cos \varphi 10^5}{T k_{\text{НС}}}, \quad (10)$$

где h_c – толщина АМ в спиральном слое, найденная из условия прочности и долговечности конструкции, см; φ – угол армирования спирального слоя, град; T – линейная плотность одной нити, текс; ρ – массовая плотность АМ, г/см³; $k_{\text{НС}}$ – количество нитей в ленте спирального слоя; D – максимальный диаметр изделия, см.

Полученное значение k_L должно быть кратно 2.

Если укладывать k_L в один слой, то возникает неоднородность и разнотяннутость нитей в ленте, приводящая к снижению конструкционной прочности АМ. Кроме того, при укладке k_L в один слой на полюсах формируется толстый слой АМ. Следовательно, укладку АМ можно разбить на несколько спиральных слоев. В каждом слое ленты АМ должны укладываться таким образом, чтобы на максимальном диаметре изде-

ля ленты ложилась встык или с перекрытием. Минимальное число лент в одном слое определяем по соотношению

$$N_{min} = \frac{2\pi D \cos \varphi}{a}, \quad (11)$$

где a – ширина ленты АМ, см; 2 – коэффициент, учитывающий формирование спирального слоя лентами одновременно в двух направлениях.

Возможное число спиральных слоев при известном количестве лент, определяем по формуле:

$$Z = \frac{k_{л}}{N_{min}}. \quad (12)$$

Полученное значение Z округляем до ближайшего целого числа в сторону уменьшения и определяем необходимое количество лент АМ в одном слое по формуле

$$N = \frac{k_{л}}{Z}. \quad (13)$$

Для укладки необходимого числа лент АМ встык на поверхности изделия вычисляется смещение (дополнительный угол поворота) объёмной модели.

Угол смещения определяем по формуле:

$$\Delta U = \frac{2U_0}{NK}, \quad (14)$$

где N – необходимое количество лент армирующего материала в одном слое; K – порядок симметрии текстурного слоя, определяемого по выражению (2) после получения полного угла поворота объёмной модели; 2-коэффициент, учитывающий укладку двух лент за один цикл; U_0 – константа станка равная одному обороту шпинделя, мм.

Шаг укладки АМ в кольцевом слое определяем по соотношению

$$C = \frac{Tk_{НК} 10^{-5}}{h_{к\rho}}, \quad (15)$$

где $k_{НК}$ – количество нитей в ленте кольцевого слоя; $h_{к}$ – толщина АМ кольцевого слоя, полученная из условия прочности и долговечности конструкции, см.

Полученное значение шага соответствует укладке АМ в один слой, а для получения укладки нити встык или укладки с малым перекрытием увеличиваем значение шага до значения ширины АМ (b).

$$C_{одн} = b, \quad (16)$$

$$C = n_{сл} C_{одн}, \quad (17)$$

где $C_{одн}$ – шаг укладки одиночного кольцевого слоя, мм.

Проворот одиночного кольцевого слоя определяем по выражению:

$$U = \frac{U_0 I_{\text{ц}}}{C_{\text{одн}}} \quad (18)$$

Данная методика служит теоретической базой для составления управляющей программы намотки на станке с ЧПУ.

Выводы

1. Проведено объёмное моделирование укладки ленты из композитного материала на внешний теоретический контур изделия.
2. Определены угол поворота и траектория геодезической кривой на каждом геометрическом участке объёмной модели.
3. Разработанная методика является основой для моделирования геодезической кривой на поверхности сложнопрофильных малогабаритных корпусов и составления управляющей программы намотки.

Список использованных источников

1. Аюшеев, Т.В. Методы трехмерного моделирования и контроля процессов изготовления деталей из композиционных материалов способом намотки [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.01.01 / Т.В. Аюшеев – Улан-Удэ, 2006. – 326 с.
2. Образцов, И.Ф. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов [Текст] / И.Ф. Образцов, В.В. Васильев, В.А. Бунаков. – М.: Машиностроение, 1977. – 144 с.
3. Воробей, В.В. Основы технологии и проектирование корпусов ракетных двигателей [Текст] / В.В. Воробей, В.Б. Маркин. – Новосибирск: Наука, 2002. – 164 с.
4. Комков, М.А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения [Текст]: учеб. пособие / М.А. Комков, В.А. Тарасов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. – 431 с.
5. Ивановский, В.С. Технологические способы повышения прочности малогабаритных оболочек давления летательных аппаратов на основе органоволокон [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.02 / В.С. Ивановский. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1987. – 176 с.

Поступила в редакцию 14.01.2013.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.В. Малков,
Восточноукраинский национальный университет
им. В. Даля, г. Луганск.*