

Исследование силы натяжения в нитях при продольной намотке изделий из композитов

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Описана математическая модель технологического процесса продольной намотки линейно и нелинейно деформируемых материалов на основе угле- и стеклонитей (ровингов) на оребренные втулки (колонки). Определены давление, действующее на каждый виток в зоне контакта, суммарное давление, действующее на тело оребренной втулки (колонки), суммарная просадка нитей. Предложен алгоритм автоматического расчета изменяемой силы натяжения армирующего материала для следящего механизма намотки.

Ключевые слова: математическая модель, модифицированное полупетлевое соединение, натяжение нити, композиционный материал.

Как известно, композиционные материалы, армированные непрерывными волокнами, обладают высокой удельной прочностью и жесткостью. Поэтому актуальным является применение их в намотанных изделиях, таких, как соединительный профиль, качалка и тяги элементов управления, рычаг подвески Мак-Ферсона и т.д. (рис.1). В настоящее время изделия из КМ получают с высокой степенью технологичности (способность автоматизации технологического процесса), что способствует повышению качества и снижению их себестоимости. Для регулирования остаточных напряжений используют связующие с определенной усадкой, в которые вводят инертные наполнители и пластификаторы [1-2]. Наряду с этим при изготовлении изделий методом намотки может быть использован еще один прием – силовая намотка.

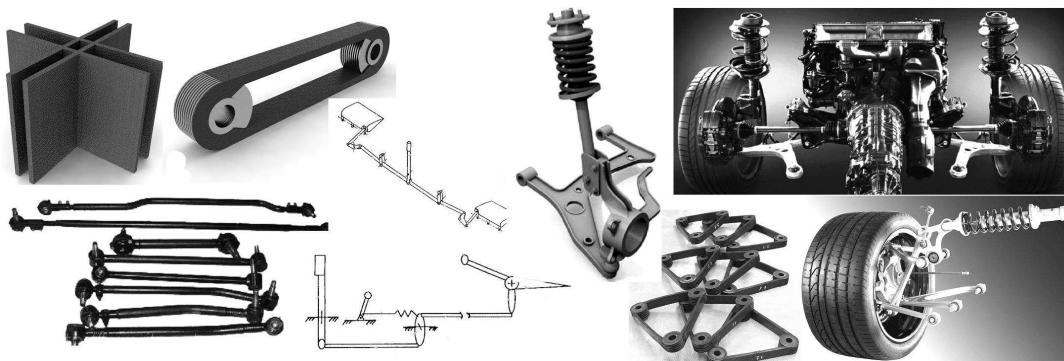


Рис. 1. Изделия из КМ, изготавливаемые намоткой

При намотке нитями (ровингом, лентами) витки накладываются друг на друга с технологическим натяжением, и под действием радиального обжимного давления происходит деформирование каждого ниже лежащего слоя, что приводит к снижению начального натяжения нитей [3-6]. Отсутствие равномерного натяжения армирующего материала вызывает появление технологических напряжений, что снижает прочностные характеристики изделия. Даже при постоянной силе натяжения, которая контролируется натяжным устройством на всем промежутке времени намотки нитей (рис. 2, а), не обеспечивается равномерное натяжение всех слоев. Для обеспечения постоянной величины остаточного натяжения в витках намотку осуществляют с переменной силой натяжения, причем при увеличении

числа витков сила натяжения растет, а после достижения середины пакета убывает до регламентированной величины по заданному уравнению натяжения.

Для создания математической модели технологического процесса намотки армирующего материала принимают следующие допущения:

- тело втулок (колонок) считают абсолютно жестким;
- отсутствует взаимное проскальзывание слоев;
- давление в радиальном направлении распределяется равномерно по поверхности контакта слоев;
- суммарная деформация слоев в радиальном направлении пренебрежимо мала по сравнению с единицей.
- в направлении намотки деформация пропитанной арматуры подчиняется закону Гука;
- трансверсальный модуль упругости определяется экспериментально;
- силовую намотку выполняют как с постоянным значением силы натяжения нити, так и с изменяющимся по программе.

Пусть армирующий материал наматывается на известное количество орбренных втулок (колонок). Радиус, расстояние между втулками и угол обхвата определяются согласно рис. 2, б.

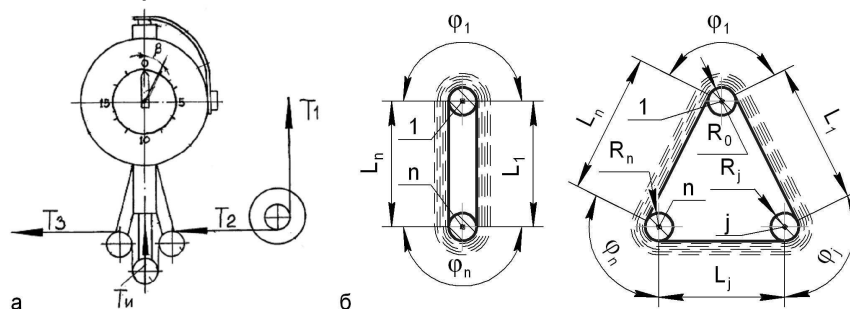


Рис. 2. Устройство контроля натяжения нити

Одним из наиболее значимых факторов, определяющих прочность деталей, является величина натяжения волокон и его равномерность. Армирующие волокна под натяжением распрямляются и более равномерно распределяют нагрузку между собой, однако чрезмерное напряжение снижает их несущую способность. Усилие натяжения не должно превышать величины [7-8]:

- для высоконагруженных деталей $N_0 \leq 0.06P_p$,
- для средненагруженных деталей $N_0 \leq 0.222P_p$,
- для слабнонагруженных деталей $N_0 \leq 0.33P_p$,

где P_p – разрушающая нагрузка армирующего материала.

Проведено испытание углеровинга TohoTenax Tenax-E HTS 5631 800TEX и стекловоинга (рис. 3, а, б), результаты которых занесены в таблицу.

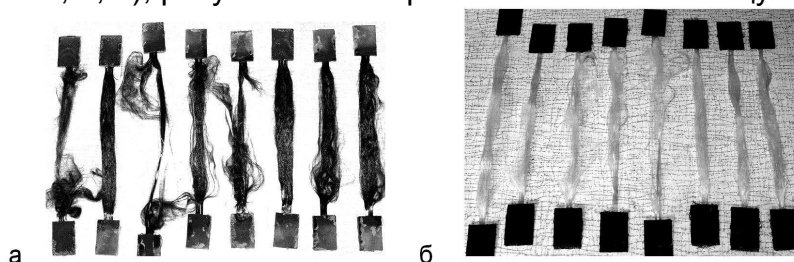


Рис. 3. Испытанные образцы из угле- и стекловоинга

Образцы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Материал	Разрушающая сила, кН											
Углеровинг	0,93	0,955	0,95	1,0	0,9	0,81	0,88	0,98	1,03	0,95	0,81	0,91
Стеклоровинг	0,51	0,51	0,58	0,53	0,45	0,52	0,55	0,53	0,53	0,55	0,49	0,52

Радиус срединной линии каждого витка армирующего материала в недеформированном состоянии рассчитывают по формуле (рис. 4)

$$R_{i,j} = R_j + \delta_0 \cdot (i - 0.5), \quad (1)$$

где δ_0, R_{0j} – толщина арматуры и радиус j-й металлической втулки;

$j = 1...k, i = 1...n$, – номер рассматриваемой катушки и намотанного витка.

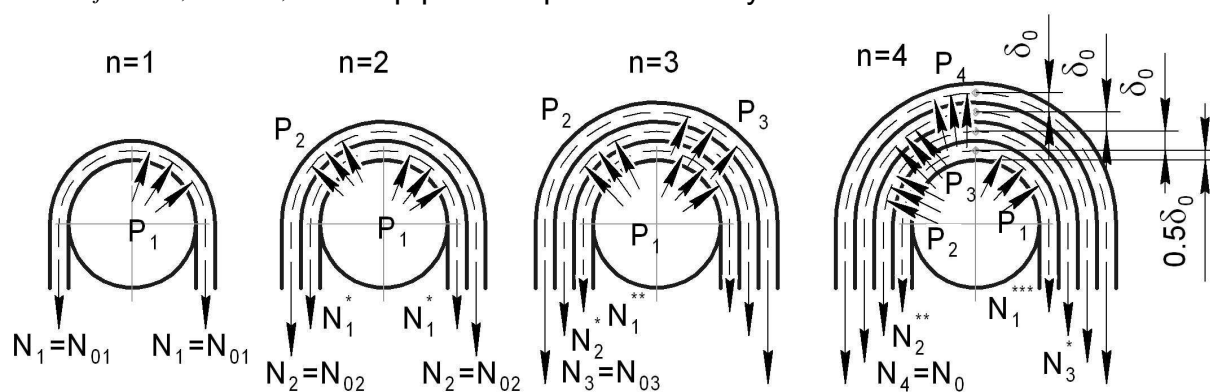


Рис. 4. Послойная намотка

Длина каждой средней линии наматываемого витка в недеформированном состоянии определяется уравнением

$$L_{арми} = \sum_{j=1}^k (L_j + R_{i,j} \cdot \varphi_j), \quad (2)$$

где L_j, φ_j – расстояние между катушками и угол обхвата (см. рис. 2).

При намотке последующего слоя лежащие ниже слои деформируются на величину, рассчитываемую по формуле

$$\varepsilon_i = \frac{L_{арми} - L_{арми}^*}{L_{арми}} = \frac{L_{арми} - (L_{арми} - \sum_{j=1}^k \Delta R_{i,j} \cdot \varphi_j)}{L_{арми}} = \frac{\sum_{j=1}^k \Delta R_{i,j} \cdot \varphi_j}{L_{арми}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta R_i}{L_{арми}}, \quad (3)$$

где ΔR_i – приращение радиуса срединной поверхности нити.

В результате деформирования каждого намотанного слоя происходит уменьшение начальной силы натяжения в нитях, приращение которой определяется формулой

$$\Delta N_i = \varepsilon_i \cdot E_1 \cdot f_i = \frac{2 \cdot \pi \cdot E_1 \cdot f_i \cdot \Delta R_i}{L_{арми}}, \quad (4)$$

где E_1 , – модуль упругости в направлении намотки;

$f_i = \delta_0 \cdot \Delta h$ – площадь поперечного сечения армирующего материала.

Каждый намотанный слой арматуры находится в равновесии под действием остаточного усилия натяжения и давления, действующего на лежащие ниже слои (см. рис. 4).

$$N_i = N_{0\lambda} - \Delta N_i = P_i \cdot R_i \cdot \Delta h, \tag{5}$$

где $N_{0\lambda}$ – сила натяжения нити, изменяемая механизмом натяжения

Подставив в (5) формулу (4), получим уравнение

$$N_{0\lambda} - \frac{2 \cdot \pi \cdot E_I \cdot f_i \cdot \Delta R_i}{L_{арми}} = P_i \cdot R_i \cdot \Delta h. \tag{6}$$

Рассмотрим модель определения приращения срединных линий армирующего материала (рис. 5).

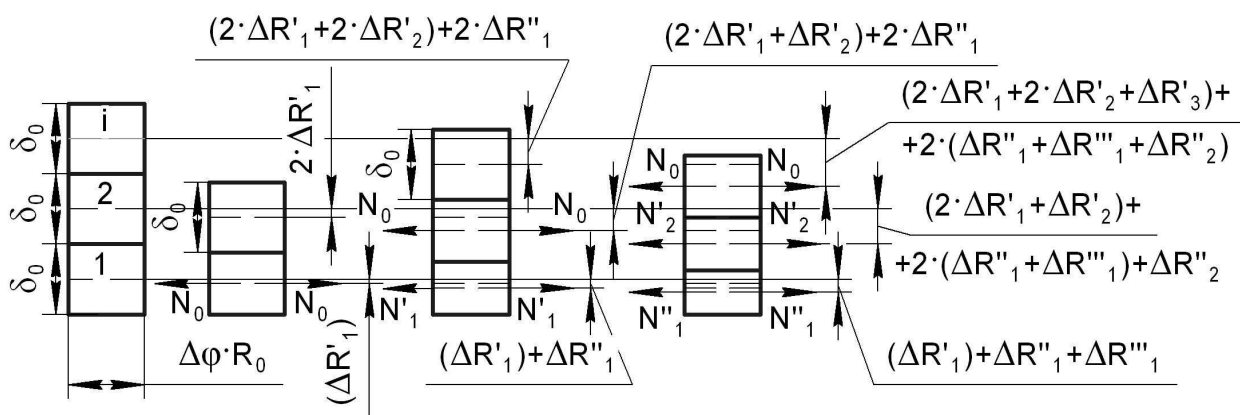


Рис. 5. Перемещение слоев в трансверсальном направлении

$$\begin{aligned} \Delta R_1 &= \frac{\delta_0}{2} \left(\frac{P_1}{E_3(P)} + \frac{P_2}{E_3(P)} + \frac{N_0}{R_3 \cdot E_3(P)} - \frac{N_{0\lambda}}{R_1 \cdot E_3(P)} \right); \\ \Delta R_2 &= 1.5 \cdot \delta_0 \left(\frac{P_2}{E_3(P)} + \frac{N_0}{R_3 \cdot E_3(P)} \right) - \frac{\delta_0}{E_3(P)} \frac{N_{0\lambda}}{R_1} - \frac{\delta_0}{2 \cdot E_3(P)} \frac{N_{0\lambda}}{R_2}; \\ \Delta R_3 &= 2.5 \cdot \delta_0 \left(\frac{N_0}{R_3 \cdot E_3(P)} \right) - \frac{\delta_0}{E_3(P)} \frac{N_{0\lambda}}{R_1} - \frac{\delta_0}{E_3(P)} \frac{N_{0\lambda}}{R_2} - \frac{\delta_0}{2 \cdot E_3(P)} \frac{N_{0\lambda}}{R_3} \dots \end{aligned} \tag{7}$$

Приращение средней линии i -го слоя для линейно и нелинейно деформируемого армирующего материала в общем виде записывается следующим образом

$$\Delta R_i = \frac{(i-0.5) \cdot \delta_0}{E_3} \cdot \sum_{k=i}^n P_k - \sum_{j=1}^i \frac{\delta_0}{E_3} \cdot \frac{N_{0\lambda}}{R_j} \cdot c_j, \tag{8}$$

$$\Delta R_i = (i - 0.5) \cdot \delta_0 \cdot \sum_{k=i}^n \frac{P_k}{E_3(P)} - \sum_{j=1}^i \frac{\delta_0}{E_3(P)} \cdot \frac{N_{0\lambda}}{R_j} \cdot c_j, \tag{9}$$

где $c_j = \{0.5 (j = i); 1 (j \neq i)\}; i = 1..n, j = 1..i;$

$E_3(P)$ – трансверсальный модуль упругости, определяемый экспериментально для нелинейно деформируемого армирующего материала.

Подставив формулу (9) в (6), получим уравнение

$$A_i = P_i \cdot \left[R_i \cdot \Delta h + \frac{B_i}{E_3(P)} \right] + B_i \cdot \sum_{k=i+1}^{n-1} \frac{P_k}{E_3(P)}, \tag{10}$$

где
$$N_{0\lambda} - \frac{2 \cdot \pi \cdot E_1 \cdot f_i \cdot \delta_0 \cdot (i-0.5)}{L_{арми}} \cdot \sum_{k=i}^n \frac{P_k}{E_3(P)} + \frac{2 \cdot \pi \cdot E_1 \cdot f_i \cdot \delta_0}{L_{арми}} \cdot \sum_{j=1}^i \frac{N_{0\lambda}}{R_j \cdot E_3(P)} \cdot c_j = P_i \cdot R_i \cdot \Delta h;$$

$$Q_i = \frac{2 \cdot \pi \cdot E_1 \cdot f_i \cdot \delta_0}{L_{арми}}; \quad B_i = Q_i \cdot (i-0.5); \quad A_i = N_{0\lambda} + Q_i \cdot \sum_{j=1}^i c_j \cdot \left(\frac{N_{0\lambda}}{R_j \cdot E_3(P)} - \frac{N_0}{R_n \cdot E_3(P)} \right);$$

Тогда P_i рассчитываем по формуле

$$P_i = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{A_i - B_i \cdot \sum_{k=i+1}^{n-1} \frac{P_k}{E_3(P)}}{R_i \cdot \Delta h + \frac{B_i}{E_3(P)}} & (k \leq n-1); \\ \frac{A_i}{R_i \cdot \Delta h + \frac{B_i}{E_3(P)}} & (k > n-1) \end{array} \right\}. \quad (11)$$

Решив систему уравнений относительно P_i , силу N_i вычисляем по формуле (5).

Суммарную просадку намотанных витков в радиальном направлении рассчитываем по формуле

$$\Delta R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \Delta R_i, \quad (12)$$

$$\Delta R_i = (i-0.5) \cdot \delta_0 \cdot \sum_{k=1}^n \frac{P_k}{E_3(P)} - \sum_{j=1}^i c_j \cdot \left(\frac{\delta_0 \cdot N_{0\lambda}}{R_j \cdot E_3(P)} \right).$$

Суммарное давление, действующее на тело втулки, вычисляем по формуле

$$\sigma_{r\Sigma} = \sum_{i=1}^n P_i. \quad (13)$$

На рис. 6, а показано изменение натяжения нитей в зависимости от отношения параметра, характеризующего анизотропию свойств наматываемого материала ($\beta = \sqrt{E_1 / E_3}$), для линейно деформируемого материала при следующих исходных данных: $N_0 = 100$; $\varphi_1 = \varphi_2 = \pi$; $R_{01} = R_{02} = 10$; $\delta_0 = 0.2$; $n=10$; $E_1 = 10^5$; $L_1 = L_2 = 200$.

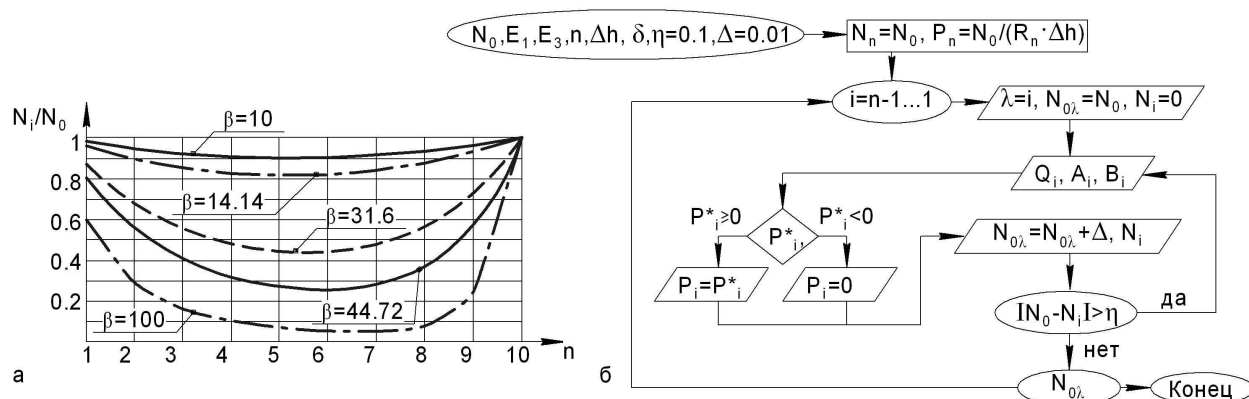


Рис. 6. Приращение натяжения арматуры и алгоритм определения рациональной начальной силы натяжения нитей

В работе [3] для устранения провисания нитей армирующего материала предложено изменить межцентровое расстояние L_j . Для изогридных конструкций, число узлов (втулок) которых больше нескольких десятков, технологически вытяж-

ку нитей с помощью изменения межцентрового расстояния крайне сложно осуществить. В этом случае наиболее реализуемым является способ силовой автоматизированной намотки с программным управлением силы натяжения нити [9-10]. Силу натяжения для каждого намотанного витка, задаваемую в программе следящего устройства, вычисляют по алгоритму (рис. 6, б).

Для удобства проведения расчетов и анализа силовой намотки написана программа на языке Delphi, позволяющая рассчитывать остаточное натяжение в нитях для линейно деформируемых и нелинейно деформируемых материалов, а также способная осуществлять автоматический расчет рациональной силы натяжения для следящей системы натяжения нити. Интерфейс программы представлен на рис. 7. Программа позволяет сохранять результаты расчета и графически изображает остаточное натяжение.

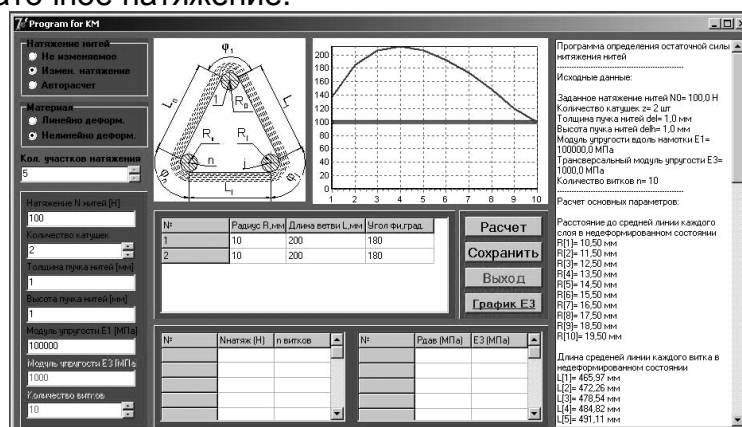


Рис. 7. Программа для определения остаточной силы натяжения в нитях ветки полупетлевых конструкций после силовой намотки

Выводы

Предложена математическая модель технологического процесса силовой намотки армирующего материала на замкнутый многоугольник с металлическими оребренными втулками (колонками) по узлам. В результате анализа расчетов выявлено, что остаточное натяжение в нитях при постоянном технологическом натяжении распределяется неравномерно и уменьшается к середине ветви. Для устранения провисания нитей предложена намотка с автоматизированным контролем силы натяжения. Написана программа, которая позволяет определить рациональное начальное натяжение, обеспечивающее равномерное натяжение в нитях ветви после силовой намотки.

Список литературы

1. Тростянская, Е.Б. Инертные наполнители [Текст] / Е.Б. Тростянская, Г.М. Гуняев, В.А. Ярцев // Механика полимеров. – Вып. 3. – Рига, 1969. – С. 481.
2. Тростянская, Е.Б. Инертные наполнители [Текст] / Е.Б. Тростянская, В.У. Новиков // Пластические массы. – Вып. 6. – Рига, 1967. – С. 9.
3. Карпов, Я.С. Соединение деталей и агрегатов из композиционных материалов [Текст] / Я.С. Карпов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т “Харьк. авиац. ин-т”, 2006. – 359 с.
4. Болотин, В.В. Анализ технологических напряжений в намоточных изделиях из композитов на протяжении всего процесса изготовления [Текст] / В.В. Болотин, А.Н. Воронцов, Р.Х. Мурзахонов // Механика композиционных мате-

риалов. – Вып. 3. – Рига, 1980. – С. 500 – 508.

5. Модели для силового анализа намотки композитов [Текст] / А.И. Бейль, А.Р. Мансуров, Г.Г. Портнов, В.К. Тринчер // Механика композиционных материалов. – Вып. 2. – Рига, 1983. – С. 303 – 313.

6. Тарнопольский, Ю.М. Изменение усилия натяжения при намотке изделий из стеклопластиков [Текст] / Ю.М. Тарнопольский, Г.Г. Портнов // Механика полимеров. – Вып. 2. – Рига, 1966. – С. 278 – 284.

7. Братухин, А.Г. Технология производства изделий и интегральных конструкций из композиционных материалов в машиностроении [Текст] / под ред. А.Г. Братухина, В.С. Боголюбова, О.С. Сироткина. – М.: Готика, 2003. – 516 с.

8. Гайдачук, А.В. Технология производства изделий из полимерных композиционных материалов [Текст]: учеб. пособ. по лаб. практикуму / А.В. Гайдачук, М.А. Сидоренкова. – Х.: Гос. аэрокосм. ун-т “Харьк. авиац. ин-т”, 1998. – 99 с.

9. Очан, М.Ю. Программируемая намотка изделий из композитов, нелинейно-упругих в поперечном направлении [Текст] / М.Ю. Очан // Механика полимеров. – Вып. 6. – Рига, 1977. – С. 987 – 993.

10. Очан, М.Ю. Об одной минимаксной задаче нахождения натяжения ленты при намотке на податливую оправку [Текст] / М.Ю. Очан // Механика полимеров. – Вып. 6. – Рига, 1975. – С. 1011 – 1020.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. В.Е. Гайдачук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

Поступила в редакцию 15.05.13

Дослідження сили натягнення у нитках при поздовжній намотці виробів із композитів

Описано математичну модель технологічного процесу поздовжньої намотки лінійно і нелінійно деформованих матеріалів на основі вугле- і склониток (ровінгів) на оребрені втулки (колонки). Визначено тиск, що діє на кожен шар у зоні контакту, сумарний тиск, що діє на тіло оребреної втулки (колонки), сумарне осідання ниток. Запропоновано алгоритм автоматичного розрахунку змінюваної сили натягу армуючого матеріалу для слідкуючого механізму намотування.

Ключові слова: математична модель, модифіковане напівпетльове з'єднання, натягнення нитки, композиційний матеріал.

Studying extension force in tows at longitudinal winding of composite articles

Mathematical model for manufacturing process of longitudinal winding on ribbed bushings (reels) of linear and non-linear deformable glass- and carbon-tow composite materials is described. Pressure applied to each reel level, total pressure applied to the reel body, tows final squeezing are determined. The algorithm of automated analysis of tow variable extension force for follower device is suggested.

Keywords: mathematical model, modified semi-loop joint, tow extension force, composite material.