

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СПИРАЛЬНОЙ НАМОТКОЙ ТОРЦЕВЫХ ЗОН КОМПОЗИТНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

А. Ю. КУТЬИН¹, В. М. МУСАЛИМОВ²

¹ ООО „ВП Петро ин трейд“, 194295, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: kutin_alex@mail.ru

² Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

Филаментная намотка — эффективный способ изготовления цилиндрических композитных изделий, но он имеет ряд существенных недостатков. Например, один из них связан с тем, что значения натяжения поверхностного слоя и внутренних слоев в партии могут ощутимо различаться от изделия к изделию. Из-за этого наблюдаются отклонения плотности намотки и других показателей ее напряженно-деформированного состояния от заданных значений. Устранить этот и другие недостатки позволит метод управления радиальным приращением композитной намотки, обеспечивающий регулирование ее плотности. Предложен алгоритм, позволяющий проектировать управляющие воздействия в торцевых зонах оправки, где происходит разворот раскладчика в обратном направлении. Использование алгоритма обусловлено необходимостью поддержания сечения намотки одинаковым на всей ширине оправки.

Ключевые слова: композитный материал, намотка, натяжение нити, управление процессом намотки

Относительно недавно все промышленные емкости, трубы и оболочки производились из металлов. Сейчас для их изготовления применяют композитные материалы. Одним из эффективных методов изготовления полых изделий (труб и больших емкостей) является филаментная намотка. Она осуществляется специальными устройствами. Волокна сматываются с бобин, установленных на шпулярнике, пропитываются в специальной ванне смолой для укрепления их структуры и последующего склеивания в намотке, а затем наматываются на вращающуюся форму (оправку).

Помимо очевидных преимуществ у этого метода есть и существенные недостатки. Например, несмотря на регулирование натяжения подаваемого материала, натяжение поверхностного слоя и внутренних слоев не удается стабилизировать и обеспечить для всех выпускаемых изделий одинаковую плотность намотки. Причина этого — случайный характер процесса наматывания и неоднородность наматываемого материала по физико-механическим показателям (линейной плотности, характеристикам упругих свойств, влажности и т.п.) [1—3].

Таким образом, актуальной является задача стабилизации плотности намотки композиционного изделия за счет управления процессом наматывания. Существующие варианты решения указанной задачи [4, 5] недостаточно эффективны из-за отсутствия связи между геометрическими параметрами намотки и параметрами ее напряженного состояния.

Для решения поставленной задачи нами предложено устройство управления процессом наматывания [6], разработанное на основе модели формирования намотки:

$$a = f(\theta), \quad \rho(\theta) - \rho_0 = \int_0^\theta a d\theta, \quad L = \int_0^\theta \rho(\theta) d\theta, \quad \gamma = \frac{mD(\rho)}{\pi H(\rho^2 - \rho_0^2)}, \quad (1)$$

где θ — угол поворота оправки, a — параметр спирали намотки, ρ_0 — радиус оправки, m — масса единицы длины наматываемого материала, H — ширина оправки, ρ — текущий радиус

намотки, L — длина композитного слоя наматываемого материала, D — длина наматываемого материала.

Параметр спирали намотки определяется отношением

$$a = v/\omega = \frac{d\rho}{d\theta} = f(\theta), \quad (2)$$

где v — скорость перемещения точки наматывания (точки контакта наматываемого материала с телом намотки) в радиальном направлении ($v = d\rho/dt$), ω — угловая скорость вращения оправки ($\omega = d\theta/dt$), t — текущее время движения точки наматывания.

При небольшой толщине параметр a практически не изменяется в процессе наматывания ($a = \text{const}$) и текущий радиус намотки рассчитывается по спирали Архимеда [6]:

$$\rho(\theta) = \rho_0 + a\theta, \quad (3)$$

а длина композитного слоя наматываемого материала рассчитывается по упрощенной формуле спрямления дуги спирали [6]:

$$L = \frac{a\theta^2}{2} + \rho_0\theta = \frac{\rho^2 - \rho_0^2}{2a}. \quad (4)$$

Уравнение (4) связывает движение точки наматывания $\rho(\theta)$ в проекции на плоскость, перпендикулярную оси вращения, с длиной композитного слоя $L(\theta)$. Согласно (1), для определения плотности намотки $\gamma(\theta)$ этого недостаточно и необходимо рассчитывать $D(\rho)$. Для этого рассмотрим движение точки наматывания на поверхности оправки в цилиндрической системе координат. В ней положение точки наматывания r в момент времени t помимо координат ρ, θ будет определяться и координатой z ($r = \{\rho, \theta, z\}$), задающей величину отрезка на образующей цилиндрической поверхности от плоскости, перпендикулярной оси вращения, в которой откладываются ρ и θ , до точки наматывания.

Диапазон изменения координаты z ограничен шириной оправки. Для $0 \leq z \leq H$ движение точки наматывания по образующей цилиндрической поверхности определяется движением раскладчика в торцевых зонах и в регулярной зоне ($H = H_T + H_P + H_T$) [7]. В торцевой зоне H_T оболочки, где происходит разворот (реверс) раскладчика, намотка осуществляется по линии равного геодезического отклонения [6]. В этой зоне плавно изменяется угол намотки β_t материала на оболочку от расчетного β до предельного значения $\beta_{\pi} = \pi/2$ при изменении скорости V_T раскладчика от V до нуля или наоборот. В регулярной зоне H_P скорость движения раскладчика постоянна ($V_T = V = \text{const}$), поэтому

$$r = \left\{ \rho, \theta, H_T + \frac{H_P}{2} \left[1 - (-1)^n \right] + (-1)^n V t \right\} \text{ при } H_T < z < H_T + H_P, \quad (5)$$

где n — число разворотов раскладчика ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$). Когда нельзя пренебречь шириной g наматываемого материала, z является координатой точки, лежащей посередине участка, занимаемого наматываемым материалом в зоне его контакта с телом намотки, на образующей цилиндрической поверхности. В этом случае $0 \leq z \leq H - g$, так как уменьшается расстояние реверсивного движения в торцевых зонах оправки ($H_T^* = H_T - g/2$).

Вследствие небольшого размера торцевых зон относительно регулярной зоны можно движение точки наматывания в них аппроксимировать равнозамедленным или равноускоренным, тогда

$$r = \left\{ \rho, \theta, \frac{H_T}{2} \left[1 - (-1)^n \right] + (-1)^n V \frac{t}{2} \right\} \text{ при } 0 \leq z \leq H_T, \quad (6)$$

$$r = \left\{ \rho, \theta, (H_m + H_p) + \frac{H_m}{2} [1 - (-1)^n] + (-1)^n V \frac{t}{2} \right\} \text{ при } H_m + H_p \leq z \leq H. \quad (7)$$

Текущее значение угла намотки β_τ материала в этих зонах, где укладка витков осуществляется по линии равного геодезического отклонения, зависит от угла геодезического отклонения φ , характеризующего равновесность нити (волокна) на поверхности оправки. Тангенс этого угла является отношением геодезической кривизны к нормальной [6]

$$\operatorname{tg} \varphi = K_{gd} / K_n = R_n / R_{gd}, \quad (8)$$

где K_n и K_{gd} , R_n и R_{gd} — нормальная и геодезическая кривизна витка и их радиус. Нормальная кривизна определяется из уравнения Эйлера:

$$K_n = K_1 \cos^2 \beta_\tau + K_2 \sin^2 \beta_\tau, \quad (9)$$

где K_1 и K_2 — наибольшая и наименьшая нормальные кривизны поверхности в точке наматывания. В данном случае для линии равного геодезического отклонения $K_1 = 0$ и $K_2 = 1/\rho$.

Из уравнения (8) с учетом (9) следует:

$$R_{gd} \operatorname{tg} \varphi = \rho / \sin^2 \beta_\tau. \quad (10)$$

Для развертывающейся цилиндрической поверхности оправки (рис. 1):

$$R_{gd} = ds / d\beta_m = dz / (d\beta_\tau \cos \beta_\tau). \quad (11)$$

После подстановки (10) в (11) получится:

$$dz = \frac{\rho \cos \beta_\tau}{\operatorname{tg} \varphi \sin^2 \beta_\tau} d\beta_\tau. \quad (12)$$

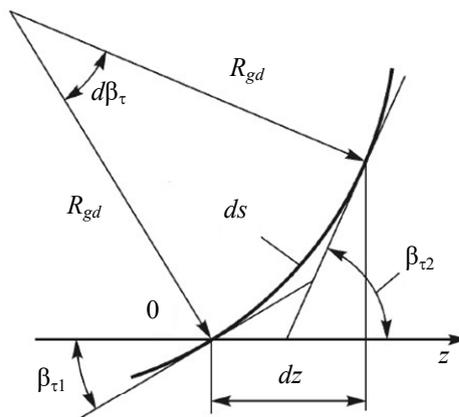


Рис. 1

Интегрирование выражения (12) позволяет найти зависимость угла намотки β_τ от величины перемещения точки наматывания вдоль координатной оси z в торцевых зонах при изменении z от нуля до H_τ или от H до $H_\tau + H_p$:

$$\frac{1}{\sin \beta_\tau} = 1 + \left[\left[z - \frac{H}{2} (1 - (-1)^n) \right] \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\rho} \right]. \quad (13)$$

Модуль слагаемого в (13) обусловлен сменой направления движения раскладчика нити и соответственно сменой направления отсчета угла намотки.

Аналогичным образом определяется зависимость угла намотки β_τ при изменении z от $H_\tau + H_p$ до H или от H_τ до нуля:

$$\frac{1}{\sin \beta_\tau} = \frac{1}{\sin \beta} - \left[\frac{(H_\tau + H_p)}{2} (1 - (-1)^{n+1}) + (-1)^{n+1} z \right] \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\rho}. \quad (14)$$

Текущее значение угла намотки β_τ связано с углом поворота оправки в торцевой зоне θ_τ дифференциальным соотношением (см. рис. 1):

$$\operatorname{tg}\beta_\tau = \frac{\rho d\theta_\tau}{dz}, \quad d\theta_\tau = \frac{dz \operatorname{tg}\beta_\tau}{\rho}. \quad (15)$$

После подстановки (12) в (15) и интегрирования получится:

$$\theta_\tau = \frac{1}{\operatorname{tg}\varphi} \left[\ln \left(\operatorname{tg} \frac{\beta_\tau}{2} \right) - \ln \left(\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \right) \right]. \quad (16)$$

При полном прохождении раскладчиком торцевой зоны оправка в соответствии с (16) повернется на угол:

$$\theta_b = \frac{1}{\operatorname{tg}\varphi} \ln \left(\frac{\sin \beta}{1 - \cos \beta} \right). \quad (17)$$

Угол намотки материала на оболочку β_τ в регулярной зоне определяется скоростью раскладчика и достигает значения β (рис. 2). Его можно рассчитать на основе отношения расстояния h , пройденного раскладчиком, за время t_1 одного оборота оправки ($t_1 = 2\pi/\omega$ при $\omega = \text{const}$) к значению длины окружности намотки:

$$h = Vt_1 = V \frac{2\pi}{\omega}, \quad \beta = \operatorname{arccctg} \left(\frac{V}{\rho\omega} \right), \quad (18)$$

где ω — угловая скорость оправки.

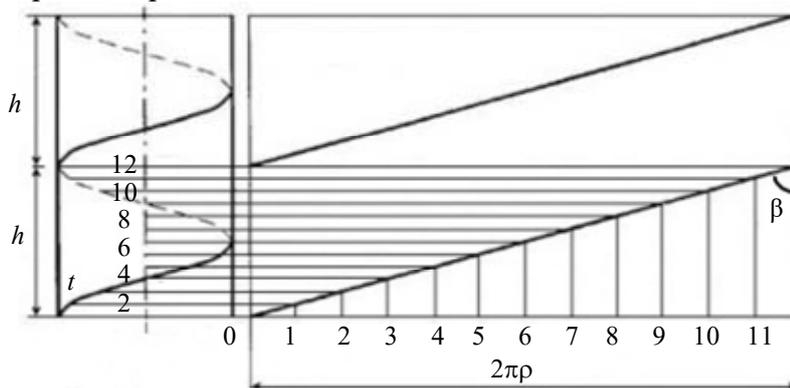


Рис. 2

Выбор в качестве аппроксимирующей функции, характеризующей движение точки наматывания в торцевой зоне, зависимости, описывающей это движение как равнозамедленное (равноускоренное), позволяет рассчитать время t_τ прохождения раскладчиком торцевой зоны H_τ и положение y на ней точки наматывания:

$$t_\tau = \frac{2H_\tau}{V}, \quad y = \frac{t_\tau V}{2}, \quad z(y) = (-1)^n y + \frac{H}{2} (1 - (-1)^n), \quad (19)$$

где $t_{\tau\tau}$ — текущее время движения раскладчика в торцевой зоне, $t_{\tau\tau} \in [0, t_\tau]$.

С учетом β_τ в (13) или (14) и z в (19) уравнение (16) представляет собой функцию θ_τ , зависящую от времени $t_{\tau\tau}$, $\theta_\tau(t_{\tau\tau})$, в соответствии с которой определяется угловая скорость в торцевой зоне:

$$\omega_\tau = \frac{\theta_\tau(t_{\tau\tau})}{t_{\tau\tau}}. \quad (20)$$

Выражение (20) используется для формирования управляющих воздействий на привод оправки с целью регулирования ее угловой скорости при движении точки наматывания в торцевых зонах в процессе формирования композитного изделия [6]. Таким образом, зависимости (13), (14), (16), (19), (20) позволяют внести необходимые изменения в алгоритм управления процессом намотки [6] и повысить его эффективность, поскольку контроль намотки

торцевых зон является неотъемлемым элементом всего процесса управления намоткой композитных цилиндрических оболочек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Образцов И. Ф., Бульчев Л. А., Васильев В. В.* и др. Строительная механика летательных аппаратов: уч-к для авиационных специальностей вузов. М.: Машиностроение, 1986. 536 с.
2. *Thwaites J. J.* The elastic deformation of a rod with helical anisotropy // Intern. J. Mech. 1977. Vol. 19, N 3. P. 161—169.
3. *Мусалимов В. М., Монахов Ю. С., Кутын А. Ю., Соловьева Г. А.* Моделирование процесса наматывания нитей на жесткий цилиндр // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Вып. 59, № 8. С. 657—663.
4. *Hashimoto H.* Intelligent Winding Machine of Plastic Films for Preventing Both Wrinkles and Slippages. Modern Mechanical Engineering. 2016. Vol. 6. P. 20—31 [Электронный ресурс]: <<http://dx.doi.org/10.4236/mme.2016.61003>>.
5. *Hashimoto H.* et al. Optimum Winding Tension and Nip-Load into Wound Webs for Protecting Wrinkle and Slippage // JSME J. of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing. 2010. Vol. 4. P. 214—225 [Электронный ресурс]:<<http://dx.doi.org/10.1299/jamdsm.4.214>>.
6. *Kutin A., Musalimov V.* Winding density regulation in the composite shell manufacture // Proc. IEEE Intern. Conf. on Mechatronics, ICM 2019. P. 332—336.
7. *Комков М. А., Тарасов В. А., Бородулин А. С.* Спиральная намотка концевых участков композитных оболочек цилиндрической и конической формы // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Машиностроение. 2012. № 4. С. 78—85.

Сведения об авторах

Алексей Юрьевич Кутын

— канд. техн. наук, доцент; ООО „ВП Петро ин трейд“; программист;
E-mail: kutin_alex@mail.ru

Виктор Михайлович Мусалимов

— д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: musvm@ya.ru

Поступила в редакцию
07.12.19 г.

Ссылка для цитирования: *Кутын А. Ю., Мусалимов В. М.* Алгоритм управления спиральной намоткой торцевых зон композитных цилиндрических оболочек // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 2. С. 157—162.

ALGORITHM FOR CONTROLLING THE SPIRAL WINDING AT THE END ZONES OF COMPOSITE CYLINDRICAL SHELLS

A. Yu. Kutin¹, V. M. Musalimov²

¹ VP PETRO IN TREID LLC, 194295, St. Petersburg, Russia
E-mail: kutin_alex@mail.ru

² ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

Significant disadvantages of the effective method of filament winding in the manufacture of cylindrical composite products are noted. One of them is related to the fact that the tension values of the surface layer and the inner layers in the batch may vary significantly from product to product. Because of this, deviations of the winding density and other indicators of its stress-strain state from the set values are observed. To eliminate this and other drawbacks, a method for controlling the radial increment of the composite winding is proposed, which provides control of its density. An algorithm is presented which allows to design control actions in the end zones of the mandrel, where the clamshell is rotated in the opposite direction. The use of the algorithm is due to the need to maintain the same winding section over the entire width of the mandrel.

Keywords: composite materials, circumferential winding, thread tension, winding control

REFERENCES

1. *Obraztsov I.F., Bulychev L.A., Vasil'yev V.V.* et al. *Stroitel'naya mekhanika letatel'nykh apparatov* (Structural Mechanics of Aircraft), Moscow, 1986, 536 p. (in Russ.)

2. Thwaites J.J. *Intern. J. Mech.*, 1977, no. 3(19), pp. 161–169.
3. Musalimov V.M., Monakhov Yu.S., Kut'in A.Yu., Solov'yeva G.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, no. 8(59), pp. 657–663. (in Russ)
4. Hashimoto H. *Modern Mechanical Engineering*, 2016, no. 6, pp. 20–31. <http://dx.doi.org/10.4236/mme.2016.61003>.
5. Hashimoto H. et al. *JSME Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2010, no. 4, pp. 214–225, <http://dx.doi.org/10.1299/jamdsm.4.214>.
6. Kutin A., Musalimov V. *Proceedings - 2019 IEEE International Conference on Mechatronics*, 2019. pp. 332–336.
7. Komkov M.A., Tarasov V.A., Borodulin A.S. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2012, no. 4, pp. 78–85. (in Russ)

Data on authors**Aleksey Yu. Kutin**— PhD, Associate Professor; VP PETRO IN TREID LLC; Programmer;
E-mail: kutin_alex@mail.ru**Victor M. Musalimov**— Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and
Robotics; E-mail: musvm@ya.ru

For citation: Kutin A. Yu., Musalimov V. M. Algorithm for controlling the spiral winding at the end zones of composite cylindrical shells. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 2. P. 157–162 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-2-157-162