

УДК 621.744; 621.642.07; 678.067.5; 658.512.22

doi:10.18720/SPBPU/2/id-157

А.Ю. Кутын¹, Л.В. Щербакова², В.М. Мусалимов³

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ



¹Алексей Юрьевич Кутын,
Балтийский государственный технический университет
(«Военмех»)
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 89006280893, E-mail: kutin_aiu@voenmeh.ru.



²Лидия Викторовна Щербакова,
Балтийский государственный технический университет
(«Военмех»)
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 79045509454, E-mail: kutin_aiu@voenmeh.ru



³Виктор Михайлович Мусалимов,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт проблем машиноведения Российской Академии наук
(ИПМаш РАН)»
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 79214217917, E-mail: musvm@yandex.ru .

Аннотация

Филаментная намотка является одним из методов изготовления композитных оболочек и представляет собой процесс укладки в определенном геометрическом порядке на поверхность оправки нитей (или лент), пропитанных композитной смолой. Нити укладываются на вращающуюся оправку с помощью раскладчика,двигающегося горизонтально вдоль оправки, натяжение нитей поддерживается на постоянном уровне. Сегодня прогресс, достигнутый в развитии лазерной техники, позволяет провести существенную модернизацию заявленного

метода. В частности, предлагается изменить его технологическую схему, заменив операцию пропитки специальной смолой армирующих нитей операцией лазерной термообработки полимерного материала, укладываемого на поверхность армирующей намотки. Предлагается также система управления геометрическими параметрами композитной намотки, ее плотностью и параметрами лазерной термообработки.

Ключевые слова: композитный материал, намотка, управление процессом намотки, лазерная термообработка.

Введение

Филаментная намотка – это технологический процесс изготовления композитных оболочек методом укладки в строгом геометрическом порядке на поверхность оправки нитей (или лент), пропитанных композитной смолой. В процессе укладки нитей оправка вращается, а раскладчик нитей движется горизонтально вдоль нее. Натяжение нитей обычно стабилизируют на определенном уровне или изменяют по определенному закону. В качестве материала намотки используются покрытые синтетической смолой углеродные нити, полиэстер, стекловолокна и т.п. После достижения требуемой толщины намотанного материала, заготовку с оправкой помещают в печь для высыхания. Когда смола затвердеет, оправку удаляют, оставляя готовое изделие.

По заявленной технологии изготавливают изделия с достаточно сложной поверхностью и заданными с определенными допусками геометрическими размерами. Полученные изделия имеют повышенную прочность, а их масса значительно меньше аналогичных изделий из металла. При необходимости натяжением нитей управляют: участки намотки с повышенным натяжением обладают более высокой прочностью по сравнению с теми участками, которые формировались с меньшим натяжением нитей. Порядок раскладки и ориентация нитей (лент) также может настраиваться с высокой точностью, обеспечивая наложение каждого нового слоя под углом к предыдущему. Угол, под которым фиксируется на оправке наматываемый материал, также влияет на свойства конечного продукта. Большой шаг раскладки придает изделию хрупкость, в то время как меньший - обеспечивает более высокий уровень прочности на разрыв.

Несмотря на кажущуюся простоту и эффективность, метод филаментной намотки имеет существенные недостатки. В частности, не удастся обеспечить одинаковый режим наматывания и одинаковое натяжение поверхностного слоя намотки и ее плотность для всех создаваемых изделий. Это обусловлено тем, что в процессе наматывания может меняться линейная плотность наматываемого материала, соотношение между его упругой, эластической и пластической

деформациями [1-3]. Изменение этих и других факторов, влияющих на процесс наматывания, неизбежно приводит к изменению траектории перемещения точки наматывания. В результате изделия, воспроизводимые в соответствии с существующим способом, отличаются друг от друга по геометрическим параметрам и по значениям плотности намотки [4,5]. Помимо этого, вдоль образующей поверхности готового изделия обычно наблюдается бугристость. Для ее устранения требуется дополнительная механическая обработка. Из-за неравномерности по толщине стенки готового изделия возникают дополнительные напряжения в осевом направлении, что приводит к преждевременному износу изделий. Механическая обработка снижает прочностные характеристики изделия.

Таким образом, актуальной является задача совершенствования технологии филаментной намотки композиционного изделия и стабилизации его плотности за счет управления процессом наматывания. Имеющиеся варианты решения указанной задачи [6,7] не являются достаточно эффективными, поскольку не учитывают влияние локальной термообработки на геометрические параметры создаваемой намотки и параметры ее напряженного состояния.

Модель наматывания

Для формирования намотки и разработки управляющих алгоритмов разработана модель наматывания, исходя из представления о том, что в сечении, перпендикулярном оси вращения оправки, движение точки наматывания происходит по спирали [8,9]. По определению, спираль - это линия, описываемая некоторой точкой при ее движении по лучу и вращении указанного луча вокруг заданного центра. Прямолинейное движение точки по лучу характеризуется скоростью перемещения v , а вращение луча характеризуется угловой скоростью ω :

$$v = dp/dt \quad , \quad \omega = d\theta/dt \quad , \quad (1)$$

где t – текущее время движения точки (в нашем случае точки наматывания, то есть точки контакта наматываемого материала с телом намотки), p - текущий радиус намотки, θ - угол поворота луча или, применительно к объекту моделирования, угол поворота тела вращения – формирующейся намотки.

Отношение v к ω называется параметром спирали или параметрической скоростью перемещения точки наматывания по ее полярному радиусу в полярных координатах:

$$a = v/\omega = dp/d\theta \quad . \quad (2)$$

В общем виде модель формируемой цилиндрической намотки можно представить уравнениями параметра спирали a , текущего радиуса p ,

длины L располагающихся по спирали композитных слоев намотки и средней объемной плотности γ намотки:

$$a = f(\theta), \quad \rho(\theta) - \rho_0 = \int_0^\theta a d\theta, \quad L = \int_0^\theta \rho(\theta) d\theta, \quad \gamma = \frac{m_s D(\rho)}{\pi H (\rho^2 - \rho_0^2)}, \quad (3)$$

где ρ_0 – радиус оправки, m_s – масса единицы длины наматываемого материала, H – ширина оправки, D – длина наматываемого материала.

При небольшой толщине намотки параметр a практически не меняет своего значения в процессе наматывания ($a = \text{const}$), и текущий радиус намотки рассчитывается по спирали Архимеда [8]

$$\rho(\theta) = \rho_0 + a\theta, \quad (4)$$

длина композитного слоя наматываемого материала рассчитывается по упрощенной формуле спрямления дуги спирали [10]

$$L = \frac{a}{2} \theta^2 + \rho_0 \theta = \frac{(\rho^2 - \rho_0^2)}{2a}. \quad (5)$$

Уравнения (2)–(5) связывают движение точки наматывания $\rho(\theta)$ в проекции на плоскость, перпендикулярную оси вращения, с длиной композитного слоя $L(\theta)$. Однако для определения плотности намотки $\gamma(\theta)$, согласно (3), этого недостаточно, поскольку необходимо рассчитывать длину наматываемого материала $D(\rho)$. Чтобы ее рассчитать, движение точки наматывания на поверхности оправки рассмотрим в цилиндрической системе координат. В ней положение точки наматывания $\vec{r}$ 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 ($0 \leq z \leq H$). В этом диапазоне движение точки наматывания по образующей цилиндрической поверхности определяется движением раскладчика в торцевых зонах и в регулярной зоне ($H = H_T + H_p + H_T$). В торцевой зоне H_T оболочки, где происходит реверс раскладчика, намотка осуществляется по линии равного геодезического отклонения [11]. В этой зоне происходит плавное изменение угла намотки β_T материала на оболочку от расчетного значения β до предельного значения $\beta_n = \pi/2$ при изменении скорости V_T раскладчика от значения V до 0 или наоборот. В регулярной зоне H_p скорость движения раскладчика постоянна ($V_T = V = \text{const}$). Таким образом, положение точки наматывания $\vec{r}$ определяется системой [12] набора координат

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

где n – количество реверсов раскладчика ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$).

Текущее значение угла намотки β_T материала на оболочку в торцевых 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 [11]:

$$\operatorname{tg} \varphi = K_{gd}/K_n = R_n/R_{gd}, \quad (7)$$

где K_n и K_{gd} , R_n и R_{gd} – нормальная и геодезическая кривизна витка и их радиусы.

Нормальная кривизна определяется из уравнения Эйлера:

$$K_n = K_1 \cos^2 \beta_T + K_2 \sin^2 \beta_T, \quad (8)$$

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 (7) с учетом (8) следует:

$$R_{gd} \operatorname{tg} \varphi = \rho / \sin^2 \beta_T. \quad (9)$$

Радиус R_{gd} геодезической кривизны витка для разворачивающейся цилиндрической поверхности оправки (рис. 1) определяется отношением

$$R_{gd} = ds/d\beta_T = dz/(d\beta_T \cos \beta_T). \quad (10)$$

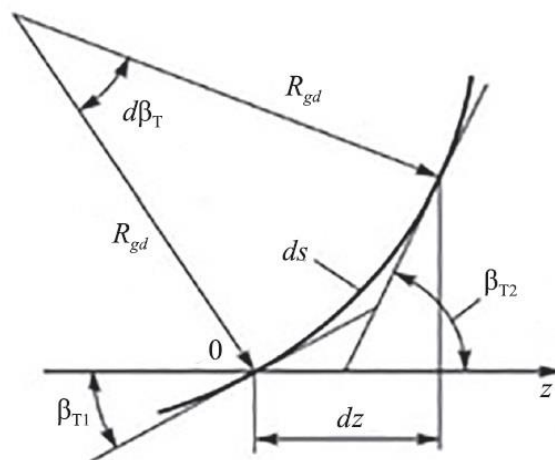


Рис. 1. Радиус геодезической кривизны витка

После подстановки (9) в (10) получится

$$dz = \frac{\rho}{tg\varphi} \frac{\cos \beta_T}{\sin^2 \beta_T} d\beta_T. \quad (11)$$

Интегрирование выражения (11) позволяет найти зависимость угла намотки β_T от величины перемещения точки наматывания вдоль координатной оси z в торцевых зонах

$$\begin{cases} \frac{1}{\sin \beta_T} = 1 + \left| \left[z - \frac{H}{2} (1 - (-1)^n) \right] \frac{tg \varphi}{\rho} \right|, \\ \frac{1}{\sin \beta_T} = \frac{1}{\sin \beta} - \left[\frac{(H_T + H_p)}{2} (1 - (-1)^{n+1}) + (-1)^{n+1} z \right] \frac{tg \varphi}{\rho}. \end{cases} \quad (12)$$

Первое уравнение справедливо при смещении координаты z в торцевых зонах от 0 до H_T или от H до $H_T + H_p$, а второе при смещении z от $H_T + H_p$ до H или от H_T до 0.

Кроме того, на основе дифференциального соотношения (11) и известных параметров движения раскладчика в регулярной зоне (угловой скорости ω оправки и V) получена аналитическая функция $D(\rho) = f(H, H_T, H_p, \omega, V)$ определения длины наматываемого материала в формуле (3) для расчета плотности намотки [12]. Предложенная модель (3,6) описывает укладку на оправку армирующих слоев намотки и слоев из термопласта с их последующей обработкой лазерным модулем.

Анализ выражения (3) показывает, что для осуществления процесса формирования намотки необходимо поддерживать фактическую скорость перемещения точки наматывания, равной теоретической. При реализации этого условия все остальные технологические показатели (радиус, длина, плотность) будут воспроизводиться по однотипным функциям. Практически это означает, что нужно поддерживать фактический радиус формируемой намотки, равным теоретическому. Величину отклонения фактического радиуса намотки от теоретического радиуса при данном значении угла поворота следует использовать для построения системы управления процессом формирования намотки. Необходимо воздействовать на намотку с переменным усилием [5,8], адекватно реагируя на случайные возмущения и обеспечивая равенство между фактическим и теоретическим радиусами намотки.

Устройство управления

Для реализации заявленного способа разработано устройство управления (рис. 2). Устройство включает в себя датчик оборотов оправки 1, датчик радиуса намотки 2, блок управления формированием намотки 3, цифроаналоговый преобразователь 4, устройство согласования 5, электромагнитную муфту 6, уплотняющий орган 7,

оправку 8, блок термообработки и охлаждения 9, датчик температуры 10. В постоянное запоминающее устройство блока устройства управления 3 заносятся постоянные величины: значения радиуса ρ_0 оправки, ее ширины H и значение r номинального теоретического приращения радиуса намотки. На основе исходных данных рассчитывается коэффициент

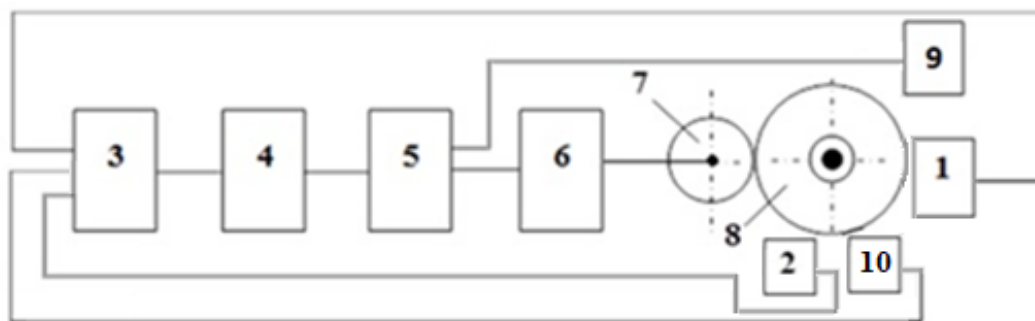


Рис. 2. Блок-схема устройства управления намоткой

$b = MT/(\pi H)$, значение которого вводится в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) блока 3. Кроме того, блок 3 рассчитывает конечное число оборотов оправки n_k и количество оборотов K_2 оправки, через которые прижимной ролик должен переместиться на величину, равную r .

В качестве блока управления 3 используется ПК-совместимый промышленный контроллер. Во время наматывания с помощью датчика радиуса измеряется фактический радиус намотки, величина которого записывается в ячейку памяти вычислительного устройства. Через заданное количество оборотов K_2 оправки производится расчет теоретического радиуса намотки в соответствии с математической моделью. Когда вычислительное устройство подсчитывает заданное количество оборотов оправки, уплотняющий орган находится в фиксированном положении, то есть не отводится, это позволяет добиться цилиндричности намотки. После расчета теоретического радиуса намотки его значение сравнивается с фактическим радиусом, который измеряется через каждые 8 оборотов оправки. Для их подсчета в ОЗУ организуется счетчик количества оборотов n_e . Информация, полученная в результате сравнения, позволяет вычислительному устройству определить величину отвода уплотняющего органа наматывающей машины и выдать сигнал исполнительному механизму для принудительного отвода с тем, чтобы обеспечить равенство между указанными радиусами. Когда количество оборотов оправки n достигнет конечного заданного значения n_k , процесс наматывания завершается.

По мере равномерного по ширине оправки заполнения поверхностного слоя армирующим волокном периодически на оправку

подается в виде волокон термопластичный материал, например, полиэтилентерефталатгликоль (PETG) – полимер, в молекуле которого чередуются бензольные кольца терефталевой кислоты и модифицированный гликоль. После формирования слоя из термопласта совокупность армирующих нитей и термопластичных волокон обрабатывается диодным лазерным модулем, входящим в состав блока 9 управляющего устройства. Равномерность заполнения слоев армирующим материалом и связующим контролируется с помощью датчика радиуса.

В качестве лазерного модуля предлагается модуль Ortur LU3-20A , мощностью 20 Вт китайского производства. Управление этим модулем осуществляется на принципах отрицательной обратной связи (ОС), т. е. всякое отклонение управляемой величины от желаемого значения сводится к нулю за счет того, что оно усиливается и с отрицательным знаком подается в место возникновения. Коэффициент передачи петли является отрицательной безразмерной величиной. Такой подход обеспечивает устойчивость системы, т. е. возможность пребывания в равновесном состоянии или вблизи него в отсутствие изменений сторонних воздействий. Температурное воздействие на термопласт регулируется за счет изменения количества импульсных питающих сигналов, подаваемых на лазер в единицу времени. При отклонении температуры на поверхности формируемого слоя от заданной, например, при ее снижении, количество импульсов увеличивается, в противном случае уменьшается. Для регулирования частоты излучения в модуле применяется система частотной автоподстройки (ЧАП). Обобщенная функциональная схема системы управления лазерным модулем показана на рис 3. Этой схеме соответствует структурная схема, показанная на рис. 4.

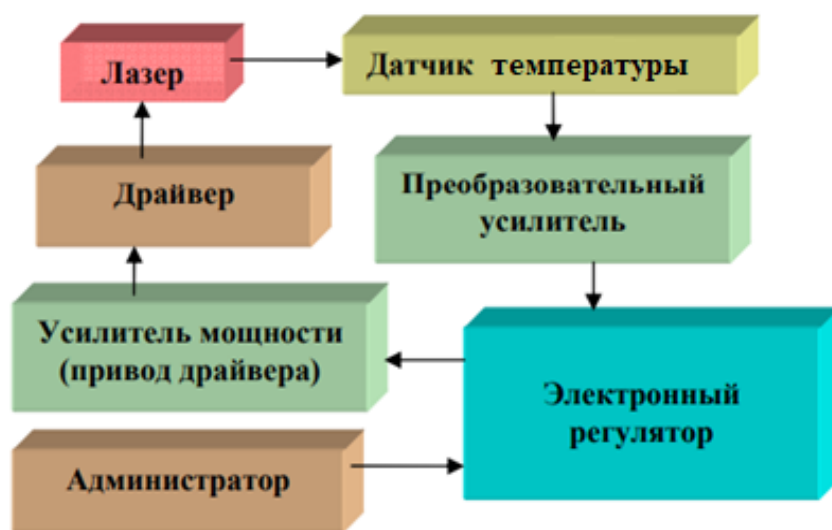


Рис. 3. Функциональная схема системы управления лазерным модулем

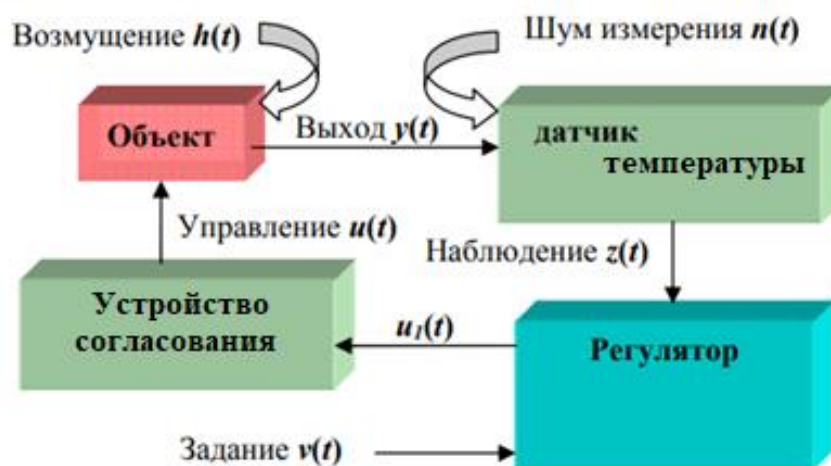


Рис. 4. Структурная схема системы управления лазерным модулем

Заключение

Таким образом, предлагается упрощение существующей технологической схемы метода филаментной намотки за счет замены операции пропитки специальной смолой армирующих нитей операцией лазерной термообработки полимерного материала, укладываемого на поверхность армирующей намотки. Такая модернизация имеет несколько преимуществ. Лазерное излучение, проходя через поверхностный прозрачный слой термопласта, воздействует непосредственно на армирующий материал, разогревает его и дает возможность соединения на молекулярном уровне с термопластом. И главное, существенно снижаются затраты на изготовление изделия, поскольку отсутствует необходимость в приобретении связующего из специальной смолы, устраняются операция по подготовке связующего в предназначенной для этого емкости и сопутствующие операции. Кроме того, эффективность решения управления процессом изменения плотности композитной намотки по заданной функции (3) по сравнению с другими решениями [13-17] обусловлена изменением радиального приращения слоев намотки и предотвращением действия случайных факторов с целью стабилизации напряженно-деформированного состояния формируемых композитных изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Образцов И.Ф. Строительная механика летательных аппаратов: учебник для авиационных специальностей вузов / И. Ф. Образцов, Л. А. Булычев, В В. Васильев и др. М.: Машиностроение, 1986. – 536 с.
- [2] Mostafa N.H., Ismarrubie Z.N., Sapuan S.M., Sultan M.T.H. Fibre prestressed composites: theoretical and numerical modelling of

- unidirectional and plain-weave fibre reinforcement forms. *Composite Structures*, 2017, V. 159, P. 410–423. doi: 10.1016/j.compstruct.2016.09.090.
- [3] Гусев, С.А. Технологические особенности изготовления толстостенного органопластика методом намотки / С.А. Гусев, В.В. Соколов, О.И. Сидоров, Г.В. Лункина, В.Ю. Гусев // *Пластические массы*, 2016, 9-10, С. 57-59.
 - [4] Битюков Ю.И. Геометрическое моделирование технологических процессов намотки и выкладки конструкций из волокнистых композиционных материалов: дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. - Моск. гос. университет, Москва, 2010 – 332 с.
 - [5] Аюшев, В.Т.. Методы трехмерного моделирования и контроля процессов изготовления деталей из композиционных материалов способом намотки: дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. - ВСГТУ, Улан-Удэ, 2006 – 326 с.
 - [6] Amin Zaami, Ismet Baran, Ton C. Bor, Remko Akkerman. New process optimization framework for laser assisted tape winding of composite pressure vessels: Controlling the unsteady bonding temperature. *Materials & Design*, 2020, V. 196, P. 126–130.
 - [7] Hashimoto H. Intelligent winding machine of plastic films for preventing both wrinkles and slippages. *Modern Mechanical Engineering*, 2016, V. 6, N 1, P. 20–31. doi: 10.4236/mme.2016.61003.
 - [8] Kutin A., Musalimov V. Winding density regulation in the composite shell manufacture // *Proc. IEEE International Conference on Mechatronics (ICM 2019)*. 2019. P. 332–336. doi: 10.1109/ICMECH.2019.8722860.
 - [9] Кутын А.Ю., Мусалимов В.М., Поляков А.С. Проектирование композитной намотки и управление процессом ее формирования. *Известия вузов. Приборостроение*, 2018, Т. 61, № 2, С. 160–166. doi: 10.17586/0021-3454-2018-61-2-160-166.
 - [10] Кутын А.Ю. Оценка погрешности при определении длины текстильного материала. *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*, 2004, № 2, С. 117–118.
 - [11] Комков М.А., Тарасов В.А., Бородулин А.С. Спиральная намотка концевых участков композитных оболочек цилиндрической и конической формы. *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана. Серия Машиностроение*, 2012, N 4. P, 78–85.
 - [12] Кутын А.Ю., Арясов Г.П. Моделирование процесса намотки композитных цилиндрических оболочек. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2020, Т. 20, № 2, С. 283 – 289. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-283-289.

- [13] Geng, H., Cao, X., Zu, L., Pan, H., Zhang, G., Zhang, Q., Fu, J., Zhou, L., Wu, Q., Jia, X., & Liu, H. (2024). The Effects of Laser-Assisted Winding Process Parameters on the Tensile Properties of Carbon Fiber/Polyphenylene Sulfide Composites. *Materials*, 17(18), 4664. <https://doi.org/10.3390/ma17184664>.
- [14] Zhong W., Yang H., Li H., Xu J. Control system design of robotized filament winding for elbow pipe. *Proc. 2nd International Conference on Measurement, Information and Control (ICMIC 2013)*, 2013, vol. 2, pp. 1081–1085. doi: 10.1109/MIC.2013.6758147.
- [15] Quanjin M., Rejab M.R.M., Idris M.S., Kumar N.M., Merzuki M.N.M. Robotic filament winding technique (RFWT) in industrial application: A review of state of the art and future perspectives. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2018, vol. 5, no. 12, pp. 1668–1675.
- [16] Sorrentino L., Marchetti M., Bellini C., Delfini A., Del Sette F. Manufacture of high performance isogrid structure by robotic filament winding. *Composite Structures*, 2017, vol. 164, pp. 43–50. doi: 10.1016/j.compstruct.2016.12.061.
- [17] Hong Ma, Aswani Kumar Bandaru, Paul M. Weaver. The effect of laser assisted tape placement processing conditions on microstructural evolution, residual stress and interlaminar shear strength of carbon fibre/PEEK laminates. *Composites Part B: Engineering*, 2024, vol. 274, 111293, doi: 10.1016/j.compositesb.2024.111293.

A.Yu.Kutin¹, L.V. Shcherbakova¹, M.V.Musalimov²

OPTIMIZATION OF THE MANUFACTURING PROCESS OF COMPOSITE POLYMER ROTATION SHELLS USING LASER HEAT TREATMENT

¹ Baltic State Technical University, Russia;

² Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian
Academy of Sciences, Russia.

Abstract

Filament winding is one of the methods for producing composite shells. It is a process of laying threads (or tapes) impregnated with composite resin in some geometric order on the surface of the mandrel. The threads are wound on a rotating mandrel using a spreader. It moves horizontally along the mandrel. The tension of the threads is constant. Today, the progress achieved in the development of laser technology allows for a significant modernization of the declared method. It

is proposed to change its technological scheme. It is necessary to replace the operation of impregnation of reinforcing threads with a special resin by the operation of laser heat treatment of the polymer material laid on the surface of the reinforcing winding. A system for controlling the geometric parameters of the composite winding, its density and laser heat treatment parameters is also proposed.

Key words: composite material, winding, winding process control, laser heat treatment.

REFERENCES

- [1] Obratsov I.F. Structural mechanics of aircraft: textbook for aviation specialties of universities / I.F. Obratsov, L.A. Bulychev, V.V. Vasiliev et al. Moscow: Mashinostroenie, 1986. – 536 p.
- [2] Mostafa N.H., Ismarrubie Z.N., Sapuan S.M., Sultan M.T.H. Fibre prestressed composites: theoretical and numerical modelling of unidirectional and plain-weave fibre reinforcement forms. *Composite Structures*, 2017, V. 159, P. 410–423. doi: 10.1016/j.compstruct.2016.09.090.
- [3] Gusev, S.A. Technological features of manufacturing thick-walled organoplastic by winding method / S.A. Gusev, V.V. Sokolov, O.I. Sidorov, G.V. Lunkina, V.Yu. Gusev // *Plastics*, 2016, 9-10, pp. 57-59.
- [4] Bityukov Yu.I. Geometric modeling of technological processes of winding and laying out structures from fibrous composite materials: diss. ... Doctor of Technical Sciences: 05.01.01. - Moscow State University, Moscow, 2010 – 332 p.
- [5] Ayushev, V.T. Methods of three-dimensional modeling and control of manufacturing processes of parts from composite materials by winding: diss. ... Doctor of Technical Sciences: 05.01.01. - VSGTU, Ulan-Ude, 2006 – 326 p.
- [6] Amin Zaami, Ismet Baran, Ton C. Bor, Remko Akkerman. New process optimization framework for laser assisted tape winding of composite pressure vessels: Controlling the unsteady bonding temperature. *Materials & Design*, 2020, V. 196, P. 126–130.
- [7] Hashimoto H. Intelligent winding machine of plastic films for preventing both wrinkles and slippages. *Modern Mechanical Engineering*, 2016, V. 6, N 1, P. 20–31. doi: 10.4236/mme.2016.61003.
- [8] Kutin A., Musalimov V. Winding density regulation in the composite shell manufacture // *Proc. IEEE International Conference on Mechatronics (ICM 2019)*. 2019. P. 332–336. doi: 10.1109/ICMECH.2019.8722860.
- [9] Kutyin A.Yu., Musalimov V.M., Polyakov A.S. Design of composite winding and control of its formation process. *Journal of Instrument*

- Engineering, 2018, Vol. 61, No. 2, pp. 160–166. doi: 10.17586/0021-3454-2018-61-2-160-166.
- [10] Kutyin A.Yu. Error assessment in determining the length of textile material. Proceedings of higher education institutions. Textile industry technology, 2004, No. 2, pp. 117–118.
 - [11] Komkov M.A., Tarasov V.A., Borodulin A.S. Spiral winding of end sections of composite shells of cylindrical and conical shape. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering, 2012, N 4. P, 78–85.
 - [12] Kutyin A.Yu., Aryasov G.P. Modeling the winding process of composite cylindrical shells. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2020, Vol. 20, No. 2, pp. 283 – 289. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-283-289.
 - [13] Geng, H., Cao, X., Zu, L., Pan, H., Zhang, G., Zhang, Q., Fu, J., Zhou, L., Wu, Q., Jia, X., & Liu, H. (2024). The Effects of Laser-Assisted Winding Process Parameters on the Tensile Properties of Carbon Fiber/Polyphenylene Sulfide Composites. *Materials*, 17(18), 4664. <https://doi.org/10.3390/ma17184664>.
 - [14] Zhong W., Yang H., Li H., Xu J. Control system design of robotized filament winding for elbow pipe. Proc. 2nd International Conference on Measurement, Information and Control (ICMIC 2013), 2013, vol. 2, pp. 1081–1085. doi: 10.1109/MIC.2013.6758147.
 - [15] Quanjin M., Rejab M.R.M., Idris M.S., Kumar N.M., Merzuki M.N.M. Robotic filament winding technique (RFWT) in industrial application: A review of state of the art and future perspectives. International Research Journal of Engineering and Technology, 2018, vol. 5, no. 12, pp. 1668–1675.
 - [16] Sorrentino L., Marchetti M., Bellini C., Delfini A., Del Sette F. Manufacture of high performance isogrid structure by robotic filament winding. Composite Structures, 2017, vol. 164, pp. 43–50. doi: 10.1016/j.compstruct.2016.12.061.
 - [17] Hong Ma, Aswani Kumar Bandaru, Paul M. Weaver. The effect of laser assisted tape placement processing conditions on microstructural evolution, residual stress and interlaminar shear strength of carbon fibre/PEEK laminates. Composites Part B: Engineering, 2024, vol. 274, 111293, doi: 10.1016/j.compositesb.2024.111293.