

УДК 678.539

Дин Кай Цзянь

канд. техн. наук, профессор

Технологический университет Китая

Китайская Народная Республика

DOI 10.21661/r-561427

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОДАЧИ НАПОЛНИТЕЛЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫХ ПУЛТРУЗИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Аннотация: в статье приведены результаты теоретического исследования процесса подачи волокон при изготовлении высоконаполненных композитов способом пултрузии. Рассмотрены основные физические факторы, влияющие на изменение сечения волокна. Разработана математическая модель, описывающая отдельное волокно и их совокупность в виде изотропного упругого материала. Получена аналитическая зависимость концентрации волокон в готовом изделии от объема подачи волокон на входе в фильеру.

Ключевые слова: пултрузия, композиционный материал, концентрация волокон, фильера.

Длинномерные изделия из полимерных композиционных материалов, обладая рядом существенных преимуществ по сравнению с изделиями из традиционных материалов, применяются в различных областях техники [1–6]. Длин-

номерные стержни и трубы изготавливают пултрузией, которая позволяет получать профильные изделия с различной формой поперечного сечения [7–9].

Известно, что физико-механические свойства композитов существенным образом зависят от относительного содержания компонентов. Реальная возможность увеличения упруго-прочностных свойств композитов за счет повышения содержания волокон заключается в уплотнении их укладки в заготовке или полуфабрикате до момента фиксации их положения в структуре композита [10]. При этом соответственно увеличиваются его упруго-прочностные характеристики.

Процесс получения длинномерных изделий из ПКМ начинается со сматывания армирующего наполнителя в виде волокон, жгутов или лент с бобин системы подачи [11–15]. Система подачи представляет собой шпулярник, выполненный в виде металлического каркаса, на котором размещены бобинодержатели, бобины и нитепроводники (рис. 1).

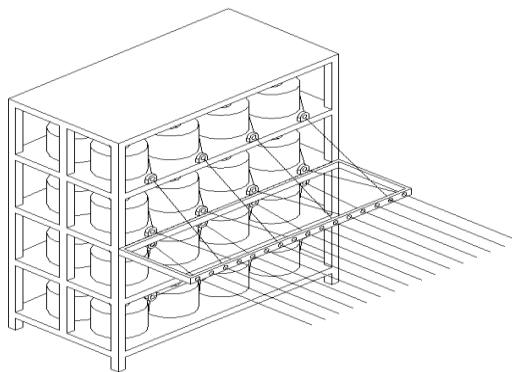


Рис. 1. Схема системы подачи волокон

Теоретическое исследование процесса подачи наполнителя при изготовлении высоконаполненных композитов проводилось с целью получения аналитических зависимостей, позволяющих определять объем подачи волокон в фильеру при заданной концентрации волокон в готовом изделии. Было сделано предположение,

что на площадь поперечного сечения волокон влияют, главным образом, давление связующего в фильере и натяжение волокон в процессе вытяжки изделия.

Определим влияние силы вытяжки при пултрузии на площадь поперечного сечения волокон. Пусть R_1 – радиус фильеры, R_2 – радиус волокна. Сначала определим, как изменяется радиус волокна за счет натяжения волокон. Пусть T – сила натяжения волокна, E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона. Тогда деформацию в продольном направлении можно представить в виде:

$$\varepsilon_1 = \frac{T}{\pi R_2^2 E} \quad (1)$$

Деформация в поперечном направлении равна: $\varepsilon_2 = -\nu \varepsilon_1$. Пусть R^* – радиус волокна после деформирования. Тогда:

$$\varepsilon_2 = \frac{R^* - R_2}{R_2} \quad (2)$$

Соотношение между радиусами можно записать в виде:

$$\frac{R^*}{R_2} = 1 - \frac{T}{\pi R_2^2 E} \nu \quad (3)$$

Так как при пултрузии вытяжка идет с постоянной скоростью, то сила натяжения волокна вычисляется через силу вытяжки при пултрузии.

Определим влияние давления связующего на площадь поперечного сечения волокон. Уплотнение волокон в фильере происходит в жидкой части матрицы, при этом давление, действующее в жидкой среде, выравнивается ее подвижностью. Сделаем допущение, что давление в фильере постоянно и, с достаточной для расчета подачи волокон точностью будем полагать, что оно равно среднему значению давления в фильере.

Пусть в фильере действует давление p . Предполагаем, что волокна выполнены из изотропного упругого материала, подчиняющегося закону Гука. Решим задачу об обжатии упругого волокна постоянным давлением. Предположим, что под действием этого давления волокно испытывает малые деформации. Запишем уравнения равновесия:

$$(\lambda + \mu)u_{j,ij} + \mu u_{i,jj} = 0 \quad (4)$$

где λ, μ – коэффициенты упругости Ламе, u_i – перемещения, $i, j = 1, 2$.

На границе волокна имеем постоянное давление p . Систему координат введем таким образом, чтобы ее начало совпадало с центром поперечного сечения волокна. Задача двумерная и осесимметричная, потому решение ищем в следующем виде:

$$u_k = u(r) \frac{x_k}{r} \quad (5)$$

где r – расстояние до начала координат, $u(r)$ – неизвестная функция, x_k – декартова координата точки, $k = 1, 2$.

Подстановка (5) в уравнения равновесия (4) дает следующее решение:

$$u(r) = C_1 r + \frac{C_2}{r} \quad (6)$$

где C_1, C_2 – константы интегрирования.

Т.к., при $r = 0$ перемещения конечны, то $C_2 = 0$. Тогда, имеет место, следующее соотношение:

$$u_k = C_1 x_k \quad (7)$$

Так как волокно выполнено из изотропного материала, то радиальные напряжения можно представить в следующем виде:

$$\sigma_{rr} = 2(\lambda + \mu)C_1 \quad (8)$$

Тогда из граничного условия имеем: $C_1 = -\frac{p}{2(\lambda + \mu)}$. Но как не сложно видеть $\varepsilon_{rr} = C_1$. Следовательно:

$$\varepsilon_{rr} = -\frac{p}{2(\lambda + \mu)} \quad (9)$$

По определению $\varepsilon_{rr} = \frac{R_{\text{кон}} - R_{\text{нач}}}{R_{\text{нач}}}$. Поэтому можно записать следующее соотношение:

$$\frac{R_{\text{кон}}}{R_{\text{нач}}} = 1 - \frac{p}{2(\lambda + \mu)} \quad (10)$$

где $R_{\text{конч}}$ – радиус волокна после обжатия давлением, $R_{\text{нач}}$ – начальный радиус волокна.

Таким образом, за счет растяжения волокон и давления в фильере изменяется площадь сечения волокна, и плотность их упаковки. Известно, что коэффициенты Ламе связаны с модулем Юнга и коэффициентом Пуассона следующими соотношениями:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (11)$$

Тогда $\lambda + \mu$ имеет следующий вид:

$$\lambda + \mu = \frac{E}{2(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (12)$$

Пусть N – количество волокон, подаваемое при изготовлении композита. Тогда начальная концентрация волокон может быть вычислена по следующей формуле:

$$n_{\text{нач}} = \frac{NR_2^2}{R_1^2} \quad (13)$$

В результате воздействия на волокно в фильере изменение радиуса его сечения можно записать в следующем виде:

$$\frac{R_{\text{кон}}}{R_2} = \left(1 - \frac{p(1+v)(1-2v)}{E}\right) \left(1 - \frac{T}{\pi R_2^2 E} v\right) \quad (14)$$

Значит, для концентрации волокон на выходе справедлива следующая формула:

$$n_{\text{кон}} = \frac{NR_{\text{кон}}^2}{R_1^2} \quad (15)$$

Эту формулу можно записать в следующем виде:

$$n_{\text{кон}} = \frac{NR_2^2 \left(1 - \frac{p(1+v)(1-2v)}{E}\right)^2 \left(1 - \frac{T}{\pi R_2^2 E} v\right)^2}{R_1^2}. \quad (16)$$

Таким образом, задавая концентрацию волокон на выходе, можно определить количество волокон на входе N. Оно будет определяться из следующего соотношения:

$$N = \left\lceil \frac{n_{\text{кон}} R_1^2}{R_2^2 \left(1 - \frac{p(1+v)(1-2v)}{E}\right)^2 \left(1 - \frac{T}{\pi R_2^2 E} v\right)^2} \right\rceil. \quad (17)$$

Квадратные скобки в формуле (17) означают взятие целой части числа.

Существуют работы, в которых исследуется максимальная возможная концентрация волокон на входе, причем для различных волокон получается разное значение концентрации [10]. На это влияют не только механические свойства волокна, но и их геометрия. Поэтому из формулы начальной концен-

трации волокон можно найти максимально допустимое количество волокон, которое определяется выражением:

$$N \leq n_1 \frac{R_1^2}{R_2^2} \quad (18)$$

где n_1 – предельно допустимая концентрация волокон при входе в фильеру с заданными механикогеометрическими свойствами.

Тогда на выходе из фильеры возможная концентрация волокон определяется из следующего соотношения:

$$\frac{nR_1^2}{R_2^2 \left(1 - \frac{p(1+v)(1-2v)}{E}\right)^2 \left(1 - \frac{T}{\pi R_2^2 E} v\right)^2} \leq n_1 \frac{R_1^2}{R_2^2} \quad (19)$$

или:

$$n \leq \left(1 - \frac{p(1+v)(1-2v)}{E}\right)^2 \left(1 - \frac{T}{\pi R_2^2 E} v\right)^2 n_1. \quad (20)$$

$$n_{\text{кон}} = \left(1 - \frac{p(1+v)(1-2v)}{E}\right)^2 \left(1 - \frac{T}{\pi R_2^2 E} v\right)^2 n_{\text{нач}}. \quad (21)$$

Пусть T_1 – усилие тянущего устройства. Поскольку усилие тянущего устройства распространяется на все сечение фильеры, то из пропорции следует, что усилие, приходящееся на волокно можно вычислить по следующей формуле:

$$T = \frac{T_1}{R_1^2} R_2^2 \quad (22)$$

Соотношение (21) перепишем в следующем виде:

$$n_{\text{кон}} = \left(1 - \frac{p(1+v)(1-2v)}{E}\right)^2 \left(1 - \frac{T_1}{\pi R_1^2 E} v\right)^2 n_{\text{нач}}. \quad (23)$$

$$N_1 = \left[\frac{n_{\text{кон}} R_1^2 \rho_{\text{нити}} \pi}{\rho_{\text{ровинг}} \left(1 - \frac{p(1+v)(1-2v)}{E}\right)^2 \left(1 - \frac{T_1}{\pi R_1^2 E} v\right)^2} \right]. \quad (24)$$

Формула (24) связывает количество нитей ровинга N_1 на входе с заданной концентрацией на выходе. Определение объема подачи первичных нитей и ровинга из различных волокон дает следующие результаты.

1. Объем подачи стеклянных волокон.

При $R_1 = 40\text{мм}$, $R_2 = 0.01\text{мм}$, $E = 7.85 \times 10^8\text{Па}$, $\nu = 0.25$, $p = 1.5 \times 10^5\text{Па}$, $T_1 = 10^5\text{Н}$, $\rho_{\text{нити}} = 2.54 \times 10^3\text{кг/м}^3$, $\rho_{\text{ровинг}} = 2 \times 10^3\text{текс}$.

По формуле (17) $N = 16.2 \times 10^6 n_{\text{кон}}$, по формуле (24) $N_1 = 6463 \times n_{\text{кон}}$.

2. Объем подачи углеродных волокон.

При $R_1 = 40\text{мм}$, $R_2 = 0.02\text{мм}$, $E = 3 \times 10^8\text{Па}$, $\nu = 0.3$, $p = 1.5 \times 10^5\text{Па}$, $T_1 = 10^5\text{Н}$, $\rho_{\text{нити}} = 1.8 \times 10^3\text{кг/м}^3$, $\rho_{\text{ровинг}} = 2.5 \times 10^3\text{текс}$.

По формуле (17) $N = 16.6 \times 10^6 n_{\text{кон}}$, по формуле (24) $N_1 = 3767 \times 10^6 n_{\text{кон}}$.

3. Объем подачи органических волокон.

При $R_1 = 40\text{мм}$, $R_2 = 0.01\text{мм}$, $E = 1.6 \times 10^8\text{Па}$, $\nu = 0.2$, $p = 1.5 \times 10^5\text{Па}$, $T_1 = 10^5\text{Н}$, $\rho_{\text{нити}} = 3.5 \times 10^3\text{кг/м}^3$, $\rho_{\text{ровинг}} = 3 \times 10^3\text{текс}$.

По формуле (17) $N = 16.8 \times 10^6 n_{\text{кон}}$, по формуле (24) $N_1 = 6172 \times 10^6 n_{\text{кон}}$.

На рис. 2 представлена зависимость концентрации различных волокон на выходе фильеры от концентрации волокон на входе в фильеру.

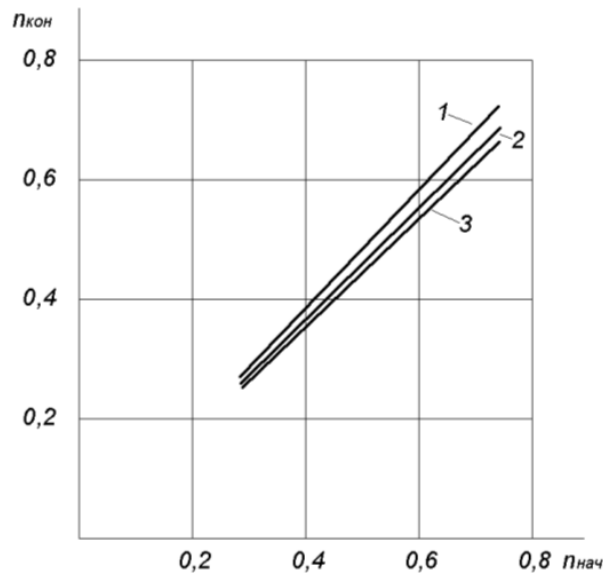


Рис.2. Зависимость концентрации волокон на выходе от концентрации

волокон на входе в фильеру: 1 – стеклянные волокна;

2 – углеродные волокна; 3 – органические волокна

Анализ полученных зависимостей показывает, что основное влияние на изменение плотности материала изделий оказывает модуль Юнга, коэффициент Пуассона материала волокон и усилие тянущего устройства, которые необходимо учитывать при получении изделий с заданной плотностью. В производственной практике параметры процесса подачи и объем наполнителя подбирают чаще всего на основании предварительных экспериментов. Расчет подачи наполнителя по выведенным соотношениям (17, 23, 24) связывает количество наполнителя на входе в фильеру с заданной концентрацией на выходе. На рис. 3 показаны сравнительные данные подачи стеклянного ровинга с линейной плотностью 2400 текс, полученные расчетным путем и использующиеся на практике.

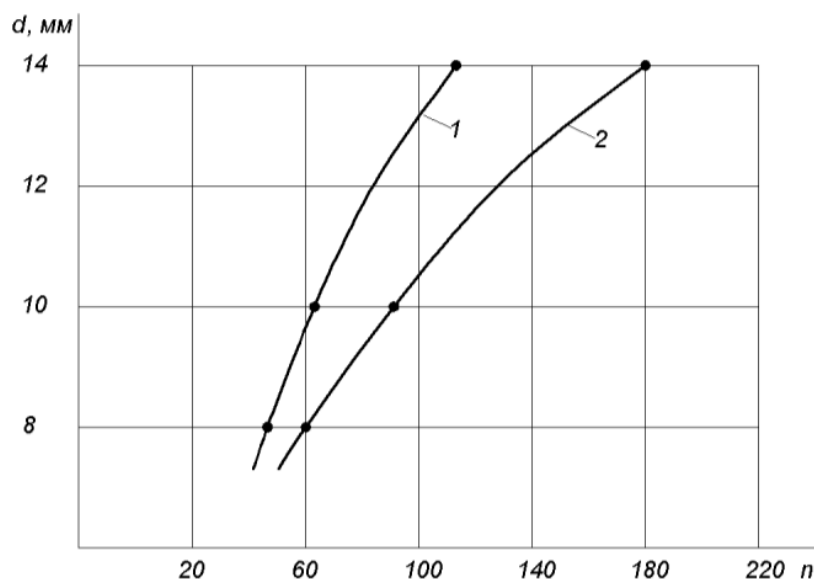


Рис. 3. Зависимость количества жгутов n для получения изделий диаметром d :

1 – используемая на практике; 2 – расчетная подача наполнителя

Главное требование к непрерывным способам и устройствам подачи наполнителя заключается в обеспечении заданного качества и свойств получаемых изделий. В теоретическом исследовании процесса подачи волокон при изготовлении высоконаполненных композитов рассмотрены основные факторы, влияющие на изменение сечения волокна. Разработанная математическая модель, описывающая волокно в виде изотропного упругого материала, и полученные аналитические зависимости концентрации волокон в готовом изделии от объема волокон на входе в фильеру, позволяют с достаточной для практики точностью рассчитывать объем подачи волокон в процессе пултрузии для получения изделий с заданными свойствами.

Список литературы

1. Красновский А.Н. Научные основы непрерывного формообразования изделий из полимерных композиционных материалов / А.Н. Красновский, И.А. Казаков, К.В. Квачев. – М.: МГТУ Станкин, 2012. – 65 с.
2. Grigoriev S.N. An Analytic Definition of the Border Polymerization Line for Axisymmetric Composite Rods / S.N. Grigoriev, A.N. Krasnovskii, I.A. Kazakov // Applied Composite Materials. DOI: 10.1007/s10443-013-9317-8.
3. Grigoriev S.N. A Study of the Process of Continuous Forming of Nanocrystalline Composite Powders / S.N. Grigoriev, A.N. Krasnovskii // Metal Science and Heat Treatment. 2012. Vol. 54. No. 1–2. pp. 13–16. DOI 10.1007/s11041-012-9448-9. EDN PDPZMJ
4. Grigoriev S.N. Distribution of the Density of Material in the Pressing Channel in Continuous Forming of Nanocrystalline Composite Powders / S.N. Grigoriev, A.N. Krasnovskii // Metal Science and Heat Treatment. 2012. Vol. 54. No. 3–4. pp. 135–138. DOI 10.1007/s11041-012-9469-4. EDN QCBSFH
5. Grigoriev S.N. Study of the Triboengineering Characteristics of Ultradispersed Composite Powder Materials / S.N. Grigoriev, A.N. Krasnovskii // Journal of Friction and Wear. 2011. Vol. 32 (3). P. 164–166. DOI 10.3103/S1068366611030056. EDN OHQRDH
6. Krasnovskii A.N. Study of Circular Slip of Superdispersed Powder Materials in Continuous Formation Processes / A.N. Krasnovskii // Journal of Friction and Wear. 2013. Vol. 34 (3). pp. 221–224. DOI 10.3103/S1068366613030094. EDN RFGUCT

7. Красновский А.Н. Математическое моделирование механики процесса пултрузии изделий из полимерных композиционных материалов / А.Н. Красновский, К.В. Квачев // Дизайн. Материалы. Технология. – 2012. – №5 (25). – С. 78–81. – EDN RCLSWJ

8. Красновский А.Н. Оптимизация конструктивных параметров фильеры для изготовления композитных стержней методом пултрузии / А.Н. Красновский, И.А. Казаков // Конструкции из композиционных материалов. – 2012. – №4. – С. 16–23. EDN PFICIB

9. Красновский А.Н. Исследование напряженно-деформированного состояния материала в процессе пултрузии / А.Н. Красновский, И.А. Казаков // Пластические массы. – 2012. – №10. – С. 22–26. EDN PJBXQP

10. Кербер М.Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / М.Л. Кербер, В.М. Виноградов, Г.С. Головкин [и др.]; под ред. А.А. Берлина. – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с. EDN QNEMVN

11. Григорьев С.Н., Красновский А.Н. Технологический комплекс для непрерывного изготовления длинномерных сложноармированных изделий из полимерных композиционных материалов / Патент России №108338, 2011.

12. Григорьев С.Н., Красновский А.Н., Хазиев А.Р. Технологический комплекс для изготовления сложноармированных изделий из полимерных композиционных материалов / Патент России №112664, 2012.

13. Григорьев С.Н., Красновский А.Н., Хазиев А.Р. Технологический комплекс для изготовления сложноармированных изделий из полимерных композиционных материалов / Патент России №115717, 2012.

14. Григорьев С.Н., Красновский А.Н., Казаков И.А. [и др.]. Технологический комплекс для изготовления композитных сложноармированных полых стержней / Патент России №118912, 2012.

15. Григорьев С.Н., Красновский А.Н., Казаков И.А. [и др.]. Устройство для изготовления армированных изделий из полимерных композиционных материалов / Патент России №118913, 2012.

16. Метель А.С. Заполнение рабочей камеры технологической установки однородной плазмой с помощью стационарного тлеющего разряда / А.С. Метель, С.Н. Григорьев, Ю.А. Мельник [и др.] // Физика плазмы. – 2009. – Т. 35. №12. – С. 1140–1149. – EDN KYGJUP