

DOI: [10.7242/1999-6691/2019.12.3.29](https://doi.org/10.7242/1999-6691/2019.12.3.29)

УДК 532.5.032+66.011

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЕПРЕГОВ ДЛЯ ДЛИННОМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ТЕРМОПЛАСТИЧНЫМ СВЯЗУЮЩИМ

О.И. Скульский

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Российская Федерация

Технология получения деталей из композиционных материалов с термопластичным связующим отличается от традиционной, использующей в этом качестве термореактивные смолы, и требует новых конструкторских и технологических решений. В данной статье предложен двухстадийный способ изготовления длинномерной углеродной несущей жилы высоковольтных проводов: на первой стадии на углеродную нить наносится термопластичный слой из расплава полиэфирэфиркетона, на второй – из нитей формируется жила и обжимается методом гидродинамического волочения. С помощью метода конечных элементов построена численная модель процесса нанесения слоя термопласта на углеродную нить в осесимметричной фильере. Для описания реологических свойств расплава полиэфирэфиркетона выбрана обобщенная модель Карро и определены входящие в нее материальные константы. Рассчитаны поля скоростей, давления и температуры, дана оценка влияния приложенного давления и скорости протяжки жилы на толщину наносимого слоя. Для стадии формирования и пропитки жилы, состоящей из покрытых термопластичным слоем углеродных нитей, в предположении, что каждая из нитей в жиле в процессе обжатия находится в одинаковых условиях, на основе аналитического решения задачи плоскорадиальной фильтрации получено безразмерное уравнение для положения фронта пропитки пористой углеродной нити под действием внешнего линейно распределенного по каналу волоки давления. Разработанная математическая модель позволяет рассчитывать поля давления и температуры, кинематику течения, оценивать влияние технологических параметров на толщину наносимого на нить термопластичного слоя и дает возможность прогнозировать степень однородности готового изделия.

Ключевые слова: композиционные материалы, углеродная нить, термопластичное связующие, реологические свойства, полиэфирэфиркетон, численная модель, толщина слоя, фронт пропитки

SOME ASPECTS OF MANUFACTURING PREPREGS FOR LONG-DIMENSIONAL PRODUCTS FROM COMPOSITE MATERIALS WITH A THERMOPLASTIC BINDER

O.I. Skul'skiy

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russian Federation

Technology for producing parts from composite materials with a thermoplastic binder differs from traditional manufacturing methods which use thermosetting resins and therefore it requires new design and technological solutions. The approach proposed in this paper involves coating carbon filaments with a layer of thermoplastic melt at the prepreg preparation stage to ensure its more uniform distribution and deeper impregnation at the product molding stage. To describe the rheological properties of a polyether ether ketone melt (PEEK), a generalized Carreau model was applied and its material constants were determined. Based on the finite element method, a numerical model of the process of applying a layer of thermoplastic on a carbon filament in an axisymmetric die was constructed. The velocity, pressure and temperature fields are calculated, and the effect of applied pressure and core drawing speed on the applied layer thickness is determined. The required layer thickness is determined from an equality of the cross-sectional areas of the applied layers and the total area of voids between the filaments and between the carbon fibers. The dependence of the resulting thickness of the applied layer on the filament drawing speed and inlet pressure is determined. Based on the analytical solution of the flat-radial filtration problem, a dimensionless equation is obtained for determining the front of impregnation of a porous carbon fiber under external pressure linearly distributed along the die channel. The proposed mathematical model allows one to determine pressure and temperature fields, kinematics of fluid flow, to evaluate the influence of technological parameters on the thickness of the thermoplastic layer applied on the filament and to predict the degree of homogeneity of the finished product.

Key words: composite materials, carbon fiber, thermoplastic binder, rheological properties. PEEK, numerical model, layer thickness, impregnation front

1. Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) с матрицами из термопластичных полимеров типа полиэфирэфиркетона, полифенилсульфида, поликарбоната и подобных появились на рынке менее 10 лет назад [1–4]. По сравнению с композиционными материалами на основе термореактивных смол [5–7] композитные термопластичные материалы обладают рядом преимуществ: высокой прочностью, повышенной стойкостью к ударным нагрузкам, химической стойкостью, пониженной токсичностью, ремонтпригодностью. К недостаткам следует отнести высокую температуру переработки, высокую вязкость расплава и низкую адгезионную способность. Композиты на основе полиэфирэфиркетона (Polyether Ether Ketone — PEEK), по сравнению с реактопластичными материалами, не требуют проведения реакции полимеризации в процессе формования изделия и обеспечивают возможность переработки и вторичного использования.

Традиционная технология получения деталей из термореактивных композиционных материалов (КМ), армированных непрерывными волокнами, заключается в следующем: сначала готовится полуфабрикат, далее препрег, который затем раскраивают, выкладывают в пакет и формируют лист или деталь [8, 9]. При создании длинномерных изделий, например, несущих жил высоковольтных проводов, препрег состоит из нитей, содержащих несколько сотен углеродных волокон. Однако специфические свойства термопластичных связующих — высокая вязкость растворов и расплавов, высокая температура перехода в вязкотекучее состояние, зависимость свойств от степени кристалличности и скорости охлаждения, низкая адгезионная способность термопластов, вносят коррективы в каждую из операций при изготовлении из них изделий.

Принимая во внимание эти особенности, предлагается вести процесс в две стадии: сначала углеродные нити покрывать слоем РЕЕК, затем формировать из них жгут и протягивать его через фильеру в режиме гидродинамического волочения. Такой способ обеспечит более равномерное начальное макрораспределение связующего в жиле и более глубокую пропитку нитей. Разработка математической модели процесса пропитки термопластичным связующим углеродных нитей на основе аналитических и численных методов механики сплошных сред и теории фильтрации позволит обосновано выбрать схему и параметры процесса получения длинномерных изделий из углеродных композиционных материалов с термопластичным связующим.

2. Реологическая модель термопластичного связующего

Реологические измерения связующего РЕЕК_G151_eng были проведены на кафедре «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета на реометре DHR-2 TA Instruments [11]. Полученные в диапазоне скорости деформации

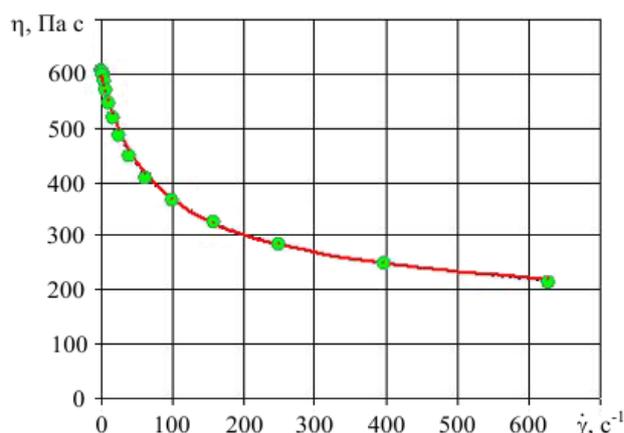


Рис. 1. Зависимость динамической вязкости от скорости деформирования: экспериментальные данные (точки) и аппроксимирующая кривая (сплошная линия).

$1 > \dot{\gamma} < 700 \text{ с}^{-1}$ при температуре $T = 360 \div 370 \text{ }^\circ\text{C}$ данные (см. Рис. 1) хорошо аппроксимируются обобщенным уравнением Карро (Carreau):

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \left[1 + \left(\beta \dot{\gamma} \right)^m \right]^{-(n-1)/m} \exp(-b(T - 360)), \quad (1)$$

где η — эффективная вязкость. В расчетах использовались следующие значения параметров модели: $\eta_0 = 600 \text{ Па·с}$; $\eta_\infty = 120 \text{ Па·с}$; $\beta = 0,02 \text{ с}$; $m = 6$; $n = 0,4$; $b = 0,4$. Теплофизические свойства приведены в таблице 1.

Таблица 1. Теплофизические свойства материалов

Название материала	Плотность ρ , кг/м ³	Теплоемкость C_p , Дж/(кг·°C)	Теплопроводность λ , Вт/(м·°C)	Температура плавления $T_{пл}$, °C
Углеродное волокно	1700	1000	0,8	—
РЕЕК_G151_eng	1320	1340	0,25	343

3. Нанесение термопластичного слоя на нить (I-я стадия)

3.1. Особенности устройства для нанесения термопластичного слоя на углеродные нити

Устройство для нанесения термопластичного слоя на нить, состоящую из сотен углеродных волокон, может быть встроено в существующую линию получения нитей из реактопластов путем замены ванны с вальками (Рис. 2) на термостатируемый блок с пакетом фильер, одна из которых представлена на рисунке 3. Геометрия фильеры обуславливается конструкторскими решениями. Управление процессом осуществляется через технологические параметры: скорость протяжки нити V_0 , давление на входе в канал P_0 и температуры T_0 , T_s и T_g .

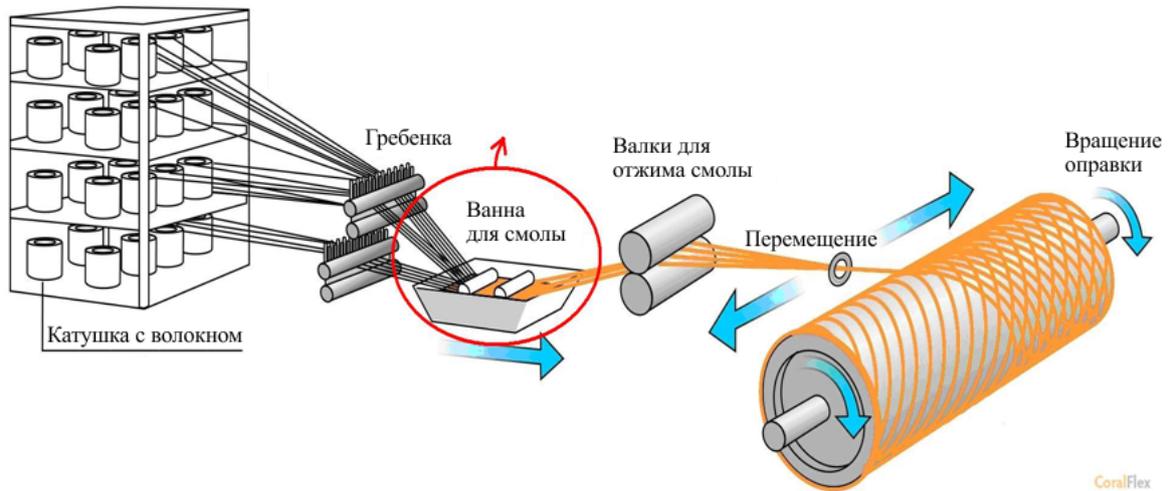


Рис. 2. Схема оборудования для пропитки углеродных нитей из реактопластичных смол

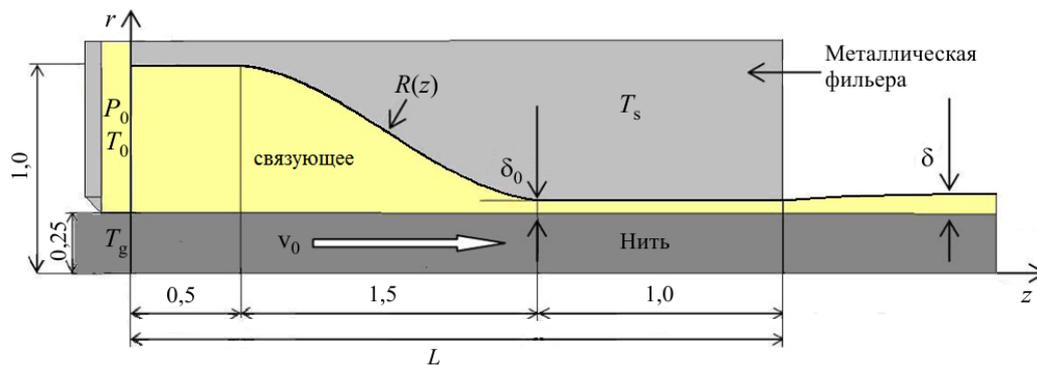


Рис. 3. Схема фильеры (размеры даны в миллиметрах)

3.2. Математическая модель процесса нанесения термопластичного слоя на углеродную нить

Стационарное неизотермическое течение несжимаемого термопластичного связующего описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных, отражающих законы сохранения импульса, массы и энергии [12–14]:

$$\rho \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\nabla p + \nabla \cdot [\eta \nabla (\mathbf{v}^T + \mathbf{v})], \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (3)$$

$$\rho C_p (\mathbf{v} \cdot \nabla) T = \nabla \cdot (\lambda \nabla T), \quad (4)$$

где \mathbf{v} — вектор скорости, p — давление, ρ — плотность, C_p — удельная теплоемкость, λ — коэффициент теплопроводности, η — эффективная вязкость, определяемая согласно уравнению (1).

Задача расчета течения в формующей оснастке ставилась в цилиндрической системе координат с учетом осевой симметрии. Предполагалось, что: на входе в канал поступает жидкость под давлением P_0 с температурой T_0 ; температура стенок канала T_s поддерживается постоянной; углеродная нить поступает в фильеру с температурой T_g ; на твердых границах выполняются условия прилипания. Диссипация механической энергии считалась пренебрежимо малой.

Согласно процедуре Галеркина краевая задача (1)–(4) преобразуется в полуслабую вариационную формулировку с естественными граничными условиями по напряжениям [15–21]. В цилиндрической системе координат с учетом осевой симметрии система уравнений имеет вид:

$$2\pi \int_0^L \int_0^{R(z)} \left\{ \rho u_r \left(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} \right) p + 2\eta \frac{u_r v_r}{r^2} + 2\eta \frac{\partial u_r}{\partial r} \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \eta \frac{\partial u_r}{\partial z} \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right\} r dr dz = 0, \quad (5)$$

$$2\pi \int_0^L \int_0^{R(z)} \left\{ \rho u_z \left(v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial u_z}{\partial z} p + 2\eta \frac{\partial u_z}{\partial z} \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \eta \frac{\partial u_z}{\partial r} \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right\} r dr dz = 2\pi \int_0^{R(0)} u_z S_z r dr, \quad (6)$$

$$2\pi \int_0^L \int_0^{R(z)} \varphi \left(\frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) r dr dz = 0, \quad (7)$$

$$2\pi \int_0^L \int_0^{R(z)} \left\{ \varphi C_p \left(v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \lambda \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\} r dr dz = 0, \quad (8)$$

где S_z — компонента вектора поверхностной нагрузки, по величине равная давлению во входном сечении канала, u_r, u_z — компоненты векторной взвешивающей функции, φ — скалярная взвешивающая функция; L — длина фильеры.

На свободной поверхности наносимого слоя, форма которой определяется из условия

$$v_r = \frac{\partial R(z)}{\partial t} + v_z \frac{\partial R(z)}{\partial z}, \quad (9)$$

задаются условия отсутствия нормальных напряжений. Форма свободной поверхности наносимого слоя вычисляется на каждом шаге итерационного процесса по разностным формулам

$$R^i = R^{i-1} + \frac{v_r^i}{v_z^i} (\Delta z^i) \quad (10)$$

до выполнения условия равенства нулю нормальной составляющей скорости.

Задача (5)–(10) решалась методом конечных элементов по официально зарегистрированной программе «FEM FLOW» [22]. При этом численная реализация полученной нелинейной системы сводится к решению последовательности линеаризованных задач, в которых нелинейные члены определяются по результатам предыдущих итераций. Сначала рассматривается линеаризованная задача течения с постоянной вязкостью, затем, с учетом известных с предыдущего шага компонент вектора скорости, — задача конвективного теплопереноса. Далее, по найденному температурному полю корректируется эффективная вязкость, а по полю скоростей вычисляются конвективные члены в температурной задаче и уточняется положение свободной границы. Процесс повторяется до достижения заданной точности.

На каждой итерации дискретизация линеаризованных задач осуществляется треугольными конечными элементами с линейной аппроксимацией компонент вектора скорости и температуры, а давление принимается кусочно-постоянным в пределах четырехугольников, состоящих из двух треугольных элементов. Контроль сходимости итерационного процесса выполняется по эффективной вязкости.

Граничные условия первого рода для скорости и температуры удовлетворяются непосредственно присваиванием заданных значений соответствующих переменных в граничных узлах.

3.3. Расчет режимов процесса нанесения полимерного слоя на углеродную нить

Основное отличие термопластов от термореактивных смол при использовании в качестве связующего состоит в необходимости создания для них высокотемпературного поля в зоне течения. Кроме того, важно обеспечить прогрев поступающей углеродной нити выше 346°C — температуры плавления термопласта в бескислородной среде, для исключения интенсивного окисления углерода.

На рисунке 4 представлены результаты расчета температурного поля в фильере при температуре поступающего расплава 370°C и температуре нити на входе 360°C. На рисунке 5 приведены поля скоростей и давлений в формирующей оснастке без приложенного на входе давления (Рис. 5а) и при давлении 2 МПа. Скорость протяжки нити 0,1 м/с.

Результирующая толщина наносимого слоя зависит от следующих управляющих параметров: геометрии инструмента; реологических свойств расплава термопласта; температурных режимов; скорости протяжки нити; давления на входе в фильеру. Три первых параметра считаются заданными, а влияние приложенного давления и скорости протяжки на толщину наносимого слоя представлено в таблице 2. Приведенные данные позволяют выбрать технологические параметры для получения требуемой толщины слоя термопласта углеродной нити.

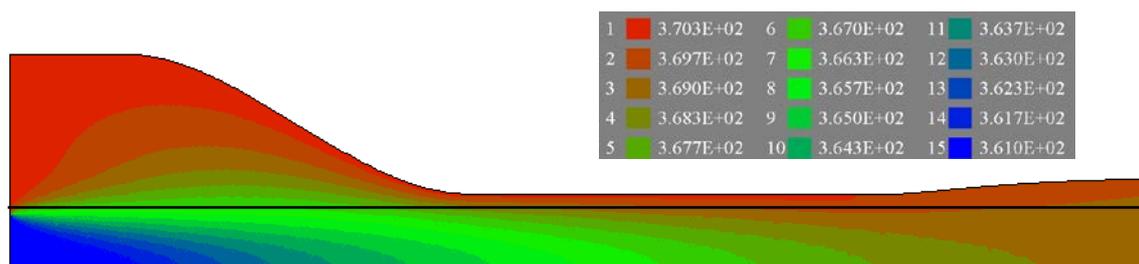


Рис. 4. Распределение температуры в фильере: температура поступающего расплава $T_s = 370^\circ\text{C}$, температура жилы на входе $T_0 = 360^\circ\text{C}$

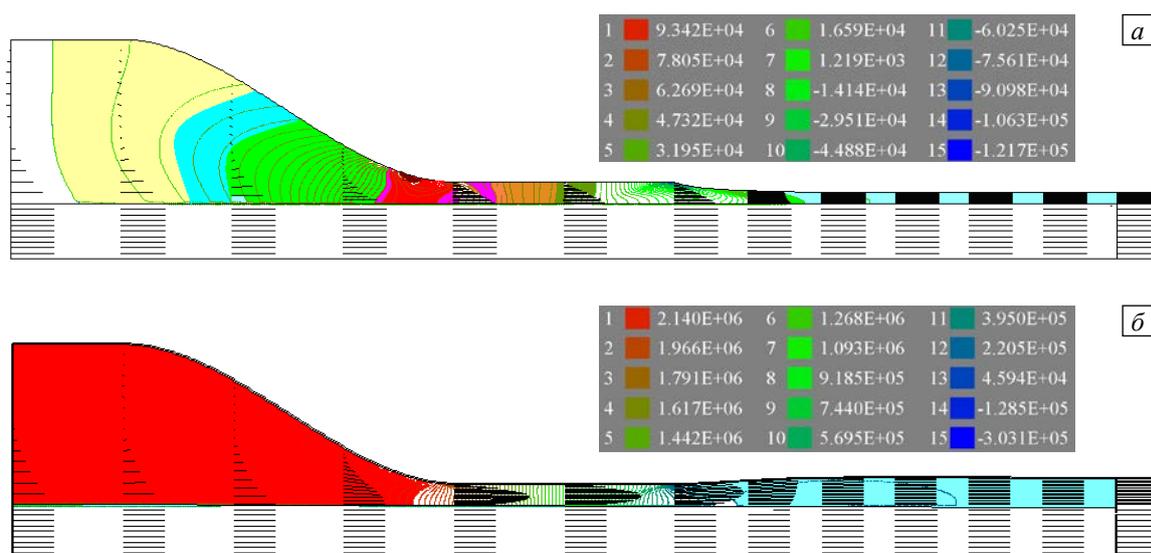


Рис. 5. Распределение давления и профили скорости в фильере без давления на входе (а) и при $P_0 = 2$ МПа (б)

Таблица 2. Радиус получаемой нити ($\times 10^3$, мм) и относительная толщина наносимого слоя термопласта δ/δ_0 (величина в круглых скобках)

Давление на входе P_0 , МПа	0,1	0,5	1,0	2,0
Скорость протяжки V_0 , м/с				
0,5	304 (0,54)	304 (0,54)	304 (0,54)	305 (0,55)
0,1	304 (0,54)	306 (0,56)	308 (0,58)	312 (0,62)
0,05	304 (0,54)	308 (0,58)	312 (0,62)	320 (0,70)
0,02	306 (0,56)	314 (0,64)	324 (0,74)	342 (0,92)
0,01	308 (0,58)	324 (0,74)	342 (0,92)	377 (1,27)
0,005	312 (0,62)	342 (0,92)	377 (1,27)	448 (1,98)
0,002	324 (0,74)	395 (1,45)	483 (2,33)	606 (3,56)

После охлаждения нить, окруженная слоем термопласта, может непосредственно использоваться в производстве препрегов в виде ткани с последующим формованием объемных изделий на стандартном прессовом оборудовании.

4. Обжатие и пропитка углеродной жилы (II-я стадия)

При изготовлении длинномерных изделий (труб, стержней, несущих жил высоковольтных проводов и другого) требуется дополнительная операция для формирования жилы: составляющие ее нити,

окруженные слоем термопластичного связующего, следует обжать в режиме гидродинамического волочения при температуре выше температуры плавления термопласта (Рис. б).

В результате расплавленный слой термопласта под действием сжимающих напряжений заполняет пространство между нитями и проникает в поры между волокнами. Далее считается, что все нити в жиле находятся в одинаковых условиях.

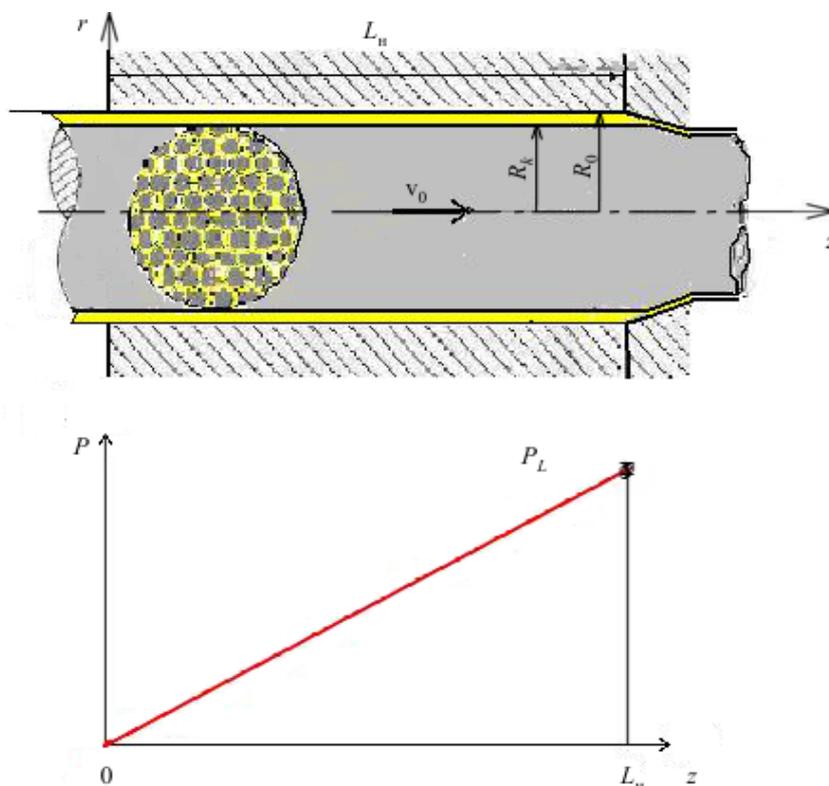


Рис. 6. Схема процесса обжатия жилы в режиме гидродинамического волочения и характер распределения давления в каждой нити по длине напорной насадки волокна

Степень пропитки отдельной нити, состоящей из пучка углеродных волокон, окруженных слоем термопласта, находящейся под действием постоянного сжимающего давления на внешнем контуре, можно рассчитать, воспользовавшись формулой Дюпюи [22], вытекающей из закона Дарси [23–26], записанного для плоскорадиальной фильтрации:

$$(R_k^2 - R_f^2) \ln(R_k/R_f) = \frac{2KP_k t}{\mu m}, \quad (11)$$

где P_k — давление на контуре нити, K — коэффициент фильтрации, μ — вязкость, m — пористость, t — время пропитки, R_k, R_f — радиусы контура и фронта пропитки.

В рассматриваемом случае распределение давления линейно по длине напорной насадки L_n волокна. Такая связь давления с продольной координатой z при постоянной скорости протяжки жилы v_0 однозначно определяет зависимость давления от времени движения материальной частицы по каналу волокна $t = z/v_0$:

$$P_L \frac{z}{L_n} = P_L \frac{v_0}{L_n} t, \quad t \in \left[0, \frac{v_0}{L_n}\right], \quad (12)$$

где максимальное давление в слое связующего на выходе из напорной насадки равно $P_L = \frac{6\mu v_0 L_n}{(R_0 - R_k)^2}$.

Используя закон Дарси, запишем выражение для скорости фильтрации w_f :

$$w_r = -\frac{K}{\mu m} \frac{\partial P(r,t)}{\partial r}. \quad (13)$$

Подставив (13) в условие несжимаемости $\frac{w_r}{r} + \frac{\partial w_r}{\partial r} = 0$, приходим к уравнению для давления:

$$\frac{1}{r} \frac{dP(r,t)}{dr} + \frac{d^2 P(r,t)}{dr^2} = 0, \quad (14)$$

решение которого с учетом граничных условий (при $r = R_k \Rightarrow P = P_L$ и при $r = R_f \Rightarrow P = 0$) имеет вид:

$$P(r,t) = P_L \frac{v_0}{L_h} t \left(1 - \frac{\ln(R_k/r)}{\ln(R_k/R_f)} \right). \quad (15)$$

Запишем (13), приняв во внимание выражение для давления (15) и скорость фильтрации как производную радиуса по времени — $w_r = dr/dt$, получим дифференциальное уравнение

$$r dr = -\frac{v_0}{L_h} \frac{K P_L}{\mu m \ln(R_k/R_f)} t dt, \quad (16)$$

решение которого дает формулу для расчета радиуса фронта пропитки R_f при линейном распределении давления по длине канала, отличающуюся от формулы Дюпюи (11):

$$(R_k^2 - R_f^2) \ln(R_k/R_f) = \frac{v_0}{L_h} \frac{K P_L t^2}{\mu m}. \quad (17)$$

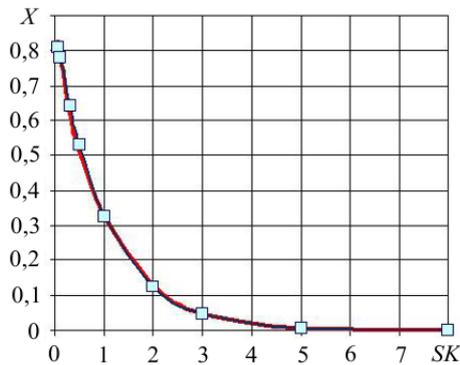


Рис. 7. Сравнение решения уравнения (18) (сплошная кривая), и аппроксимирующего выражения (19) (линия с маркерами)

аппроксимирующим выражением:

$$X = 0,886 \exp(-0,981 SK), \quad (19)$$

обеспечивающим приемлемую точность в диапазоне значений $0,1 < SK < 10$ (Рис. 7).

Приведем пример оценки пропитки нити в процессе гидродинамического волочения с параметрами: $L_h = 0,01$ м, $R_0 = 4,5 \cdot 10^{-4}$ м, $R_k = 3,5 \cdot 10^{-4}$ м, $v_0 = 0,01$ м/с, $K = 10^{-12}$ м², $\mu = 400$ Па·с, $m = 0,5$.

При этом:

– распределение давления по длине следующее: $P = P_L \frac{z}{L_h}$, где максимальное давление в волоке составляет

$$P_L = 2,4 \cdot 10^7 \text{ Па};$$

- время воздействия давления на движущуюся нить определяется по формуле $t = \frac{L_n}{v_0}$ и равно 1 с;
- значение безразмерного параметра $SK = 0,979$;
- X приближенно равно 0,339;
- радиус фронта пропитки $R_f = R_k X = 1,186 \cdot 10^{-4}$ м.

В данном случае относительная площадь пропитки нити достигает $\frac{R_k^2 - R_f^2}{R_k^2} 100\% = 88,5\%$.

5. Заключение

Основной проблемой производства длинномерных углетермопластиков является трудность пропитки углеродных волокон высоковязким связующим. Предложенный двухстадийный способ — сначала нанесение термопластичного слоя на углеродную нить, а затем формирование и обжатие жилы методом гидродинамического волочения — позволяет улучшить качество пропитки и с минимальной модернизацией использовать существующее технологическое оборудование.

Разработанная математическая модель дает возможность рассчитать поля давления и температуры, кинематику течения и оценить влияние технологических параметров на толщину наносимого на нить термопластичного слоя. Требуемая толщина слоя определяется из условия равенства площадей поперечных сечений наносимых слоев и суммарной площади пустот между нитями и между углеродными волокнами.

Полученное на основе аналитического решения задачи плоскорадиальной фильтрации безразмерное уравнение для положения фронта пропитки пористой нити под действием внешнего линейно распределенного по каналу волоки давления дает возможность оценить степень пропитки углеродных нитей термопластичным связующим и позволяет прогнозировать степень однородности готового изделия.

Литература

1. *O'Bradaigh C.M.* Sheet forming of composite materials // Flow and rheology in polymer composites manufacturing / Ed. S.G. Advani. Elsevier, 1995.
2. *Johnson A.F.* Rheological model for the forming of fabric-reinforced thermoplastic sheets // Composites Manufacturing. 1995. Vol. 6. P. 153-160. [https://doi.org/10.1016/0956-7143\(95\)95006-K](https://doi.org/10.1016/0956-7143(95)95006-K)
3. *Johnson A.F., Picket A.K.* Numerical simulation of the forming process in long fibre reinforced thermoplastics // WIT Transactions on Engineering Sciences. 1996. Vol. 10. P. 233-242. (URL: <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-engineering-sciences/10/8842>)
4. *Сироткин О.С., Андрюнина М.А., Бейдер Э.Я.* Новые конструкционные и функциональные ПКМ на основе термопластов и технологии их формования // Авиационная промышленность. 2012. № 4. С. 43-47.
5. *Chen X., Zhang Y., Shilin Y.* Two-dimensional simulations of resin flow in dual-scale fibrous porous medium under constant pressure // J. Reinforc. Plast. Compos. 2013. Vol. 32. P. 1757-1766. <http://dx.doi.org/10.1177/0731684413496573>
6. *Yang B., Tang Q., Wang S., Jin T., Bi F.* Three-dimensional numerical simulation of the filling stage in resin infusion process // J. Compos. Mater. 2016. Vol. 50. P. 4171-4186. <https://doi.org/10.1177%2F00219983166631809>
7. *Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н.* Термопластичные связующие для полимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ. 2015. № 11. С. 40-49. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2015-0-11-5-5>
8. *Saad A., Echchel A., Hattabi M., El Ganaoui M., Lahlou F.* Numerical simulation and analysis of flow in resin transfer moulding process // FDMP. 2012. Vol. 8. P. 277-294. <https://doi.org/10.3970/fdmp.2012.008.277>
9. *Doi M., Edwards S.F.* The theory of polymer dynamics. Oxford University Press, 1986. 404 p.
10. *Сильченко Д.Г., Гришин С.В., Гладков И.Б.* Композиционный несущий сердечник для внешних токоведущих жил проводов воздушных высоковольтных линий электропередачи и способ его производства. Патент РФ № 2386183 от 10.04.2010 г.
11. *Ериов С.В.* Пространственное течение расплавов полимеров в канале зоны дозирования пластицирующего экструдера и формирующего инструмента / Дисс... канд. тех. наук: 01.02.05. Пермь, ПНИПУ, 2018. 119 с.
12. *Кузнецова Ю.Л., Скульский О.И.* Исследование реологических моделей растворов полимеров на реометрических течениях // Математическое моделирование в естественных науках. 2013. С. 92-94.
13. *Скульский О.И., Аристов С.Н.* Механика аномально вязких жидкостей. М.-Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2004. 154 с.
14. *Кузнецова Ю.Л., Скульский О.И.* Влияние режимов течения на расслоение сдвигового потока жидкости с немонотонной кривой течения // ПМТФ. 2019. Т. 60, № 1. С. 27-36. <https://doi.org/10.15372/PMTF20190104>
15. *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов. М., Мир, 1979. 392 с.
16. *Zienkiewicz O.C, Taylor R.L., Zhu J.Z.* The finite element method. Its basis and fundamentals. Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-24909-9>
17. *Cook R.D., Malkus D.S., Plesha M.E.* Concepts and applications of finite element analysis. Wiley, 1989. 637 p.

18. Pickett A.K., Queckbörner T., de Luca P., Haug E. An explicit finite element solution for the forming prediction of continuous fibre-reinforced thermoplastic sheets // *Composites Manufacturing*, 1995. Vol. 6. P. 237-243. [https://doi.org/10.1016/0956-7143\(95\)95016-R](https://doi.org/10.1016/0956-7143(95)95016-R)
19. Jenny P., Lee S.H., Tchelepi H.A. Adaptive fully implicit multi-scale finite-volume method for multi-phase flow and transport in heterogeneous porous media // *J. Comput. Phys.* 2006. Vol. 217. P. 627-641. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2006.01.028>
20. Димитриенко Ю.И., Левина А.И., Боженик П. Конечно-элементное моделирование локальных процессов переноса в пористых средах // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки*. 2008. № 3. С. 90-103.
21. Димитриенко Ю.И., Шууган Ли. Конечно-элементное моделирование неизоэтермического стационарного течения неньютоновской жидкости в сложных областях // *Математическое моделирование и численные методы*. 2018. № 2. С. 70-95. (URL: <http://mmcm.bmstu.ru/articles/164/>)
22. Скульский О.И., Фонарев А.В., Кузнецова Ю.Л. «FEM FLOW» – конечно-элементная программа для расчета течения вязкоупругой жидкости в каналах со свободной поверхностью с учетом неизоэтермичности: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007611760 от 25.04.2007.
23. Баренблатт Г.И., Енгов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра, 1984. 211 с.
24. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. М.: Институт компьютерных исследований, 2004. 641 с.
25. LeBel F., Fanaei A.E., Ruiz É., Trochu F. Prediction of optimal flow front velocity to minimize void formation in dual scale fibrous reinforcements // *Int. J. Mater. Form.* 2014. Vol. 7. P. 93-116. <https://doi.org/10.1007/s12289-012-1111-x>
26. Димитриенко Ю.И., Богданов И.О. Многомасштабное моделирование процессов фильтрации жидкого связующего в композитных конструкциях, изготавливаемых методом RTM // *Математическое моделирование и численные методы*. 2017. № 2. С. 3-27. (URL: <http://mmcm.bmstu.ru/articles/131/>)

References

1. O'Bradaigh C.M. Sheet forming of composite materials. *Flow and rheology in polymer composites manufacturing*, ed. S.G. Advani. Elsevier, 1995.
2. Johnson A.F. Rheological model for the forming of fabric-reinforced thermoplastic sheets. *Composites Manufacturing*, 1995, vol. 6, pp. 153-160. [https://doi.org/10.1016/0956-7143\(95\)95006-K](https://doi.org/10.1016/0956-7143(95)95006-K)
3. Johnson A.F., Pickett A.K. Numerical simulation of the forming process in long fibre reinforced thermoplastics. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 1996, vol. 10, pp. 233-242. (URL: <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-engineering-sciences/10/8842>)
4. Sirotkin O.S., Andriunina M.A., Beider E.Ya. New structural and functional polymeric composite materials based on thermoplastics AND their molding technology. *Aviatsionnaya promyshlennost' – Aviation industry*, 2012, no. 4, pp. 43-47.
5. Chen X., Zhang Y., Shilin Y. Two-dimensional simulations of resin flow in dual-scale fibrous porous medium under constant pressure. *J. Reinforc. Plast. Compos.*, 2013, vol. 32, pp. 1757-1766. <http://dx.doi.org/10.1177/0731684413496573>
6. Yang B., Tang Q., Wang S., Jin T., Bi F. Three-dimensional numerical simulation of the filling stage in resin infusion process. *J. Compos. Mater.*, 2016, vol. 50, pp. 4171-4186. <https://doi.org/10.1177/0021998316631809>
7. Beyder E.Y., Petrova G.N. The thermoplastic binder for polymeric composite materials. *Trudy VIAM – Proceedings of VIAM*, 2015, no. 11, pp. 40-49. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2015-0-11-5-5>
8. Saad A., Echchelh A., Hattabi M., El Ganaoui M., Lahlou F. Numerical simulation and analysis of flow in resin transfer moulding process. *FDMP*, 2012, vol. 8, pp. 277-294. <https://doi.org/10.3970/fdmp.2012.008.277>
9. Doi M., Edwards S.F. *The theory of polymer dynamics*. Oxford University Press, 1986. 404 p.
10. Sil'chenkov D.G., Grishin S.V., Gladkov I.B. RF Patent No. 2,386,183, Byull. Izobret., 10 April 2010.
11. Ershov S.V. *Prostranstvennoye techeniye rasplavov polimerov v kanale zony dozirovaniya plastitsiruyushchego ekstrudera i formuyushchego instrumenta* [The spatial flow of polymer melts in the channel of the dosing zone of a plasticizing extruder and a forming tool]. PhD Dissertation, Perm National Research Polytechnic University, Perm, 2018. 119 p.
12. Kuznetsova Yu. L., Skul'skiy O.I. Issledovaniye reologicheskikh modeley rastvorov polimerov na reometricheskikh techeniyakh [The study of rheological models of polymer solutions in rheometric flows]. *Matematicheskoye modelirovaniye v estestvennykh naukakh*, 2013, pp. 92-94.
13. Skul'skiy O.I., Aristov S.N. *Mekhanika anomal'no vyazkikh zhidkostey* [Mechanics of abnormally viscous fluid]. Moscow-Izhevsk: Regul'yarnaya i khaoticheskaya dinamika, 2004. 154 p.
14. Kuznetsova Yu.L., Skul'skiy O.I. Effect of different flows on the shear branding of a liquid with a non-monotonic flow curve. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2019, vol. 60, no. 1, pp. 22-30. <https://doi.org/10.1134/S0021894419010048>
15. Segerlind L.J. *Applied finite element analysis*. Wiley, 1976.
16. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. *The finite element method. Its basis and fundamentals*. Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-24909-9>
17. Cook R.D., Malkus D.S., Plesha M.E. *Concepts and applications of finite element analysis*. Wiley, 1989. 637 p
18. Pickett A.K., Queckbörner T., de Luca P., Haug E. An explicit finite element solution for the forming prediction of continuous fibre-reinforced thermoplastic sheets. *Composites Manufacturing*, 1995, vol. 6, pp. 237-243. [https://doi.org/10.1016/0956-7143\(95\)95016-R](https://doi.org/10.1016/0956-7143(95)95016-R)
19. Jenny P., Lee S.H., Tchelepi H.A. Adaptive fully implicit multi-scale finite-volume method for multi-phase flow and transport in heterogeneous porous media. *J. Comput. Phys.*, 2006, vol. 217, pp. 627-641. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2006.01.028>

20. Dimitrienko Yu.I., Levina A.I., Bozhenik P. Finite element modeling of local processes of transfer in porous media. *VestnikMGTU im. N.E. Baumana. Seriya: Estestvennyye nauki – Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2008, no. 3, pp. 90-103.
21. Dimitrienko Y.I., Shuguang Li. Konechno-elementnoye modelirovaniye neizotermicheskogo statsionarnogo techeniya nen'yutonovskoy zhidkosti v slozhnykh oblastyakh [Mathematical simulation of non-isothermal steady flow of non-Newtonian fluid by finite element method]. *Matematicheskoye modelirovaniye i chislennyye metody – Mathematical Modeling and Computational Methods*, 2018, no. 2, pp. 70-95. (URL: <http://mmcm.bmstu.ru/articles/164/>)
22. Skul'skiy O.I., Fonarev A.V., Kuznetsova Yu.L. «FEM FLOW» – finite element program for calculating the flow of a viscoelastic fluid in channels with a free surface, taking into account non-isothermal. RF Copyright Certificate No. 2007611760, 25 April 2007.
23. Barenblatt G.I., Entov V.M., Ryzhik V.M. *Dvizheniye zhidkostey i gazov v prirodnykh plastakh* [The movement of liquids and gases in natural strata]. Moscow, Nedra, 1984. 211 p.
24. Muskat M. *The flow of homogeneous fluids through porous media*. McGraw-Hill Book Company, 1937. 783 p.
25. LeBel F., Fanaei A.E., Ruiz É., Trochu F. Prediction of optimal flow front velocity to minimize void formation in dual scale fibrous reinforcements. *Int. J. Mater. Form.*, 2014, vol. 7, pp. 93-116. <https://doi.org/10.1007/s12289-012-1111-x>
26. Dimitrienko Yu.I., Bogdanov I.O. Mnogomasshtabnoye modelirovaniye protsessov fil'tratsii zhidkogo svyazuyushchego v kompozitnykh konstruksiyakh, izgotavlivayemykh metodom RTM [Multiscale modeling of liquid binder filtration processes in composite structures manufactured by RTM]. *Matematicheskoye modelirovaniye i chislennyye metody – Mathematical Modeling and Computational Methods*, 2017, no. 2, pp. 3-27. (URL: <http://mmcm.bmstu.ru/articles/131/>)

Поступила в редакцию 10.06.2019; после доработки 19.09.2019; принята к опубликованию 30.09.2019