

4. Turygin, Y. V.; Zubkova, J. V.; Maga, D. Investigation of Kinematic Error in Transfer Mechanisms of Mechatronic System // Proceedings of 15th Mechatronika 2012. – Praha : Czech Technical University in Prague, 2012. – Pp. 351-353. – ISBN 978-80-01-04985-3.

5. Турыгин Ю. В., Зубкова Ю. В. Исследование точности позиционирования выходного звена мехатронной системы // Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах – УТЭОСС-2012 : материалы конф. (Санкт-Петербург, 9–11 окт. 2012 г.) : в рамках

5-й рос. мультikonф. по проблемам управления / ГНЦ РФ ОАО «Концерн „ЦНИИ „Электроприбор“» [и др.]. – СПб., 2012. – С. 814–817.

6. Pintér, T.; Božek, P. Industrial Robot Control using Inertial Navigation System // Advanced Materials Research Vol. 605-607 : 2nd International Conference on Materials and Products Manufacturing Technology, ICMPMT 2012, Guangzhou, 22-23 Sept. 2012. – Pp. 1600-1604. – ISBN 978-303785544-7.

* * *

Yu. V. Turygin, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

J. V. Zubkova, Post-graduate, Senior Teacher, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Experimental investigation of kinematic error influence on positioning accuracy of output element of mechatronic complex

The paper describes the results of experimental researching the positioning process of the output element of a mechatronic system in order to check the developed mathematical model taking into account the system characteristics. The relationship between kinematic characteristics of a manipulator and the actuator deviation from the assigned position in track following is experimentally confirmed.

Keywords: positioning accuracy, mechatronic system, error

Получено: 07.06.13

УДК 678; 67.02; 62-1/-9

Ф. А. Уразбахтин, доктор технических наук, профессор;

Ю. Ю. Харинова, аспирант

Воткинский филиал

Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОПИТКИ ПРЕПРЕГА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВОЛОКНИСТЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ*

Предлагается математическая модель процесса пропитки стекловолоконного препрега, позволяющая определить возникновение предельных состояний, а также количественно оценить качество выполнения процесса пропитки препрега волокнистых конструктивных композитных материалов.

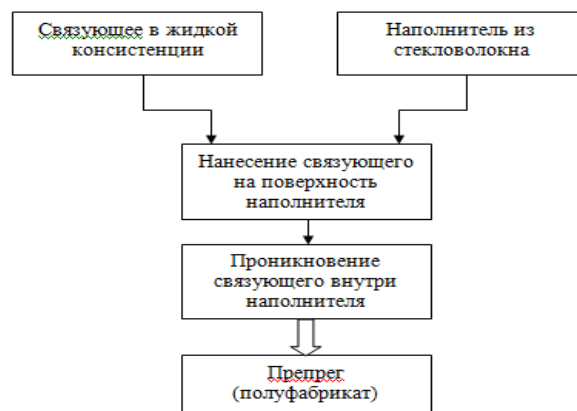
Ключевые слова: пропитка, математическая модель, предельное состояние, показатель критичности

При создании композиционных материалов, состоящих из связующего и наполнителя в виде стекловолоконной ткани для деталей и узлов ракет, выполняется технологическая операция пропитки. Операция является определяющей при создании полуфабриката (препрега).

Необходимые механические характеристики таких препрегов возникают при выборе наполнителя и связующего, физико-механических и технологических параметров, а также качественном выполнении самого процесса пропитки. Сам процесс сводится к целенаправленному взаимодействию между связующим и тканым стекловолоконным наполнителем. Он состоит из двух последовательных действий – нанесения связующего, находящегося в жидкой консистенции, на поверхность наполнителя и проникновения его внутрь волокнистой структуры наполнителя.

Нанесение связующего на поверхность проводится на вертикально или горизонтально движущуюся стекловолоконную ткань наполнителя. На практике широкое применение находит вариант, при котором рулонная стекловолоконная ткань

пропускается через ванну, заполненную связующим, находящимся в жидкой консистенции. Именно для этого способа осуществляется построение математической модели.



Технологическая система процесса пропитки

Для этого выделена технологическая система, состоящая из связующего, наполнителя и самого процесса их взаимодействия (рис.).

Математическая модель пропитки препрега представляется в виде конечного множества комплексных показателей [2]

$$Y = \{Y_1, Y_2, Y_3\}, \quad (1)$$

каждый из которых оценивает проявление каждым элементом системы – связующим (Y_1), наполнителем (Y_2), а также процессом пропитки (Y_3).

Показатели в (1) представляются в виде подмножеств

$$Y_i = \{y_{i,j}, j = 1, m\}, \quad (2)$$

которые являются оценками проявления отдельного свойства – степенями приближения по интенсивности к предельному значению.

Все показатели $y_{i,j}$ представляются в безразмерном виде. Предполагаем, что при значении, равном нулю, имеет место предельное состояние. В случае проявления свойства наилучшей интенсивности с точки зрения качества пропитки соответствует значение показателя – 1,0.

Рассмотрим конкретные выражения частных показателей $y_{i,j}$ в математической модели (1–2).

1. *Связующее* в конструкционном композиционном материале обеспечивает непрерывность препрега и связь с наполнителем по всему объему. В процессе создания препрегов оно проявляет свойства, которые с точки зрения технологического процесса пропитки учитываются такими характеристиками, как плотность, вязкость, количество летучих веществ [1].

Комплексный показатель, оценивающий проявления свойств связующим, содержит пять элементов:

$$Y_1 = \{y_{1,j}, j = 1..5\}. \quad (3)$$

Первым элементом в (3) является частный показатель, оценивающий наступление предельного состояния, связанного с недостатком массы связующего в конструкционном композиционном материале. Этот показатель определяется выражением

$$y_{1,1} = \frac{M_c}{M_{\text{сред}}}, \quad (4)$$

где $M_c = M_a \frac{K_n}{100 - K_n}$ – масса связующего, приходящаяся на единицу площади поверхности пропитываемого наполнителя; M_a – масса наполнителя, которая приходится на единицу площади; K_n – коэффициент технологических потерь; $M_{\text{сред}}$ – требуемая масса связующего для качественной пропитки, которая определяется технологическим процессом.

При создании препрега важным является проявление вязкости. Чрезмерно высокая вязкость приводит к предельному состоянию, при котором из-за возникающих больших сил трения связующее не сможет проникать в поры наполнителя. Количес-

венная оценка степени близости этого состояния является вторым показателем:

$$y_{1,2} = T_\tau / T_n \quad \text{при} \quad \eta_\tau \in [T_n, T_k], \quad (5)$$

где η_τ – максимальное значение вязкости связующего, при котором происходит проникновение пор наполнителя; T_n, T_k – начальная и конечная температуры связующего в процессе пропитки наполнителя.

Текущее значение вязкости связующего в зависимости от температуры T_τ определяется выражением [3]

$$\eta_\tau = \eta_0 \cdot \exp \left[\frac{E_0}{R} \left(\frac{1}{T_\tau} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \quad (6)$$

где T_0 – базовая температура, при которой вязкость связующего – η_0 ; E_0 – энергия активации связующего при вязком течении (температуре – T_0); R – универсальная газовая постоянная.

Технологический процесс пропитки происходит в диапазоне температур, при котором связующее будет проникать в поры наполнителя. В этом случае за пределами этого температурного диапазона возникает предельное состояние. Оно оценивается показателем

$$y_{1,3} = T_\tau / T_n, \quad (7)$$

где $T_n = \left[\frac{R}{E_0} \ln \left(\frac{\eta_n}{\eta_0} \right) - \frac{1}{T_0} \right]$ – температура, при которой связующее достигнет предельной вязкости η_n .

Связующее после полного проникновения в поры затвердевает в процессе полимеризации. Этот процесс происходит при температуре полимеризации $T_{\text{пл}}$ в течение определенного отрезка времени – $\tau_{\text{пл}}$, специфичным для каждого связующего.

Возникновение предельных состояний здесь можно оценивать по показателям, характеризующим степень близости к температуре полимеризации и допустимой длительности нахождения связующего в жидкой консистенции:

$$y_{1,4} = \frac{T_\tau}{T_{\text{пл}}} \quad \text{при} \quad \tau = \tau_{\text{пр}} \quad \text{и} \quad y_{1,5} = \frac{\tau_{\text{пр}}}{\tau_{\text{пл}}}, \quad (8)$$

где $\tau_{\text{пр}}$ – длительность процесса пропитки наполнителя.

2. *Наполнитель* является обязательным элементом в структуре конструкционных композиционных материалов, определяющим механические свойства материала. При его выборе необходимо также исключить возникновение предельных состояний. Появление этих состояний связано с несоответствием хотя бы одному техническому требованию.

Для случая стекловолоконного наполнителя в математической модели показатель проявления свойств $Y_2 = \{y_{2,j}, j = 1, 4\}$ определяется следующими показателями.

Для качественной пропитки необходимо оценивать наполнитель по объемной пористости [1]:

$$\Pi = 1 - \frac{\rho_{\text{стр}}}{\rho_{\text{нап}}}, \quad (9)$$

где $\rho_{\text{стр}}$, $\rho_{\text{нап}}$ – плотность препрега и материала, из которого изготовлено стеклотканое волокно.

Если технологическим процессом установлена номинальная объемная плотность и допуск $\Pi_n \pm \Delta_1$, то тогда показатель критичности имеет вид

$$y_{2,1} = \frac{2 \times \Pi}{(\Pi_n + \Delta_1) + (\Pi_n - \Delta_1)}. \quad (10)$$

Обычно тканевые наполнители характеризуются диаметром элементарных волокон – d_b . Если диаметр волокна отличается от установленного в технологическом процессе пропитки, то тогда можно ожидать появление предельного состояния. Выражение показателя этого состояния имеет вид:

$$y_{2,2} = \frac{2 \cdot d_b}{(d_{\text{вн}} + \Delta_2) + (d_{\text{вн}} - \Delta_2)}, \quad (11)$$

где $d_{\text{вн}} \pm \Delta_2$ – номинальный диаметр с величиной разброса стекловолокнистого тканевого наполнителя.

Требования при проведении пропитки связующим устанавливаются на линейную плотность стекловолокна наполнителя – T_m , т. е. массу волокна длиной 1 000 м. Она устанавливается техническими условиями в виде номинального значения с двухсторонним допуском – $T_{\text{мп}} \pm \Delta_3$. Считаем, что предельное состояние возникает в случае, когда фактическое значение линейной плотности стекловолокна T_m не будет удовлетворять техническим условиям. Выражение критичности для этого случая имеет вид

$$y_{2,3} = \frac{2 \cdot T_m}{(T_{\text{мп}} + \Delta_3) + (T_{\text{мп}} - \Delta_3)}. \quad (12)$$

Технологической характеристикой, на значения которой установлены в технических условиях ограничения, является поверхностная плотность ткани наполнителя – ρ_n . Ограничения на значения устанавливаются традиционно в виде номинального значения и двухстороннего допуска – $\rho_{\text{пн}} \pm \Delta_4$.

Предельным состоянием является случай, когда поверхностная плотность ткани наполнителя не соответствует техническим условиям. Количественной оценкой, характеризующей это состояние, является выражение показателя:

$$y_{2,4} = \frac{2 \times \rho_n}{(\rho_{\text{пн}} + \Delta_4) + (\rho_{\text{пн}} - \Delta_4)}. \quad (13)$$

3. *Процесс пропитки наполнителя связующим.* В процессе пропитки происходит взаимодействие связующего и наполнителя, в ходе которого могут возникать предельные состояния. Совокупность оце-

нок этих состояний составляет содержание третьего показателя $Y_3 = \{y_{3,j}, j = 1, 9\}$.

Наполнитель в виде стекловолоконной ткани имеет пористую структуру, элементом которой являются каналы – капилляры.

Процесс проникновения связующего в такие каналы начинается с вытеснения воздуха из капилляров. Это действие может происходить только в том случае, когда преодолевается давление, создаваемое силами поверхностного натяжения связующего. Предельный случай соответствует ситуации, когда вытеснение воздуха не происходит. Этот случай характеризуется показателем

$$y_{3,1} = \frac{P_{\text{кф}}}{P_{\text{кап}}}, \quad (14)$$

где $P_{\text{кап}}$ – предельное значение капиллярного давления (обычно находится экспериментально); $P_{\text{кф}} = 4 \cdot \sigma_{\text{ж,ф}} \cos \theta_{\text{см}} / d_{\text{кап,ф}}$ – фактическое капиллярное давление, возникающее в межволоконном капилляре от действия связующего [5]; $\sigma_{\text{ж,ф}}$ и $\sigma_{\text{см,ф}}$ – напряжение натяжения и угол смачивания поверхностной пленки полиэфирной смолы в жидком состоянии; $d_{\text{кап}}$ – диаметр межволоконного капилляра.

Связующее в ходе пропитки должно заполнить межволоконное пространство. Предельным состоянием является случай неполного заполнения. Оно определяется показателем, построенным на соотношении коэффициентов проницаемости:

$$y_{3,2} = \frac{2 \cdot K_d}{(K_{\text{дн}} + \Delta_5) + (K_{\text{дн}} - \Delta_5)}, \quad (15)$$

где $K_d = \frac{d_b^2}{32K_{\text{изв}}}$ – фактическая степень проникнове-

ния связующего вглубь каналов стекловолоконного тканного наполнителя; $K_{\text{изв}}$ – коэффициент извилистости капилляра, $K_{\text{изв}} = 1,21 \dots 1,25$; V_v – объемное содержание волокон в конструкционном композиционном материале [5].

Следующей важной технологической характеристикой пропитки является скорость движения связующего по капилляру. Она определяется выражением [6]:

$$u_{\text{кап}} = K_d \cdot \sum P_d / \eta_{\text{т}} h_{\text{л}}, \quad (16)$$

где $\sum P_d = P_{\text{кап}} + \Delta P_{\text{вн}}$ – суммарное давление связующего, создаваемое при движении вдоль капилляра, в случае пропитки без дополнительного внешнего избыточного давления $\Delta P_{\text{вн}} = 0$; $\eta_{\text{т}}$ – коэффициент вязкости связующего; $h_{\text{л}}$ – толщина ленты стеклоткани наполнителя [6].

При чрезмерно большой скорости $u_{\text{кап}}$ в процессе пропитки на поверхности наполнителя появится толстая пленка связующего, которая после отвердевания создает неоднородность конструктивного композиционного материала. В то же время при недостаточ-

ной скорости $u_{\text{кап}}$ связующее не полностью может проникнуть в поры (капилляры) наполнителя. Предельные значения скоростей проникновения определяются для конкретных материалов связующего и наполнителя экспериментально в виде номинального значения и технологического допуска – $u_{\text{кн}} \pm \Delta_6$.

В этом случае за индикатор возникновения предельного состояния по скоростям пропитки можно принять показатель

$$y_{3,3} = \frac{2 \cdot u_{\text{кап}}}{(u_{\text{кн}} + \Delta_6) + (u_{\text{кн}} - \Delta_6)}. \quad (17)$$

В процессе пропитки связующее, находясь в жидкой консистенции, проникает в поры наполнителя под действием сил гидростатического давления. Возникновение предельного состояния может быть определено по глубине проникновения связующего. Максимально возможная глубина проникновения связующего определяется выражением [7]:

$$h_{\text{max}} = \frac{S_{\text{уд}} \cdot \sigma_{\text{ж.т}} \cdot \cos \theta_{\text{см.ф}}}{j \cdot g \cdot \Pi}, \quad (18)$$

где $S_{\text{уд}}$ – площадь поверхности зоны контакта связующего с наполнителем; $\sigma_{\text{ж.т}}$ – поверхностное натяжение на границе жидкость – тело; j – удельный вес материала связующего; g – ускорение свободного падения.

Однако глубина пор в наполнителе ($h_{\text{н}}$), определенная экспериментально, может оказаться больше, чем h_{max} , что и будет соответствовать предельному состоянию, которое оценивается показателем

$$y_{3,4} = \frac{h_{\text{н}}}{h_{\text{max}}}. \quad (19)$$

Фактическая глубина проникновения $h_{\text{т}}$ связующего может оказаться и еще меньше. Тогда ее можно определить из уравнения [7]:

$$S_{\text{уд}} \cdot \sigma_{\text{ж.т}} \cdot \cos \theta_{\text{см.ф}} - j \cdot g \cdot \Pi \cdot h_{\text{т}} - \frac{S_{\text{уд}}}{r_{\text{эф}}} \eta_{\text{т}} \cdot h_{\text{т}} \frac{dh_{\text{т}}}{d\tau} = 0. \quad (20)$$

Для наполнителей с регулярной пористой структурой решение (20) представляется в виде:

$$h_{\text{т}} = \sqrt{\frac{2}{\eta_{\text{т}}} \sigma_{\text{ж.т}} \cdot \cos \theta \cdot r_{\text{эф}} \cdot \tau}, \quad (21)$$

где $\tau = L / V$ – продолжительность контакта наполнителя со связующим; V – скорость поступления связующего на поверхность наполнителя; $L = S_{\text{уд}} / B$ – длина области контакта; B – ширина стекловолоконного тканевого наполнителя; $\sigma_{\text{ж.т}}$ – поверхностное натяжение на границе жидкость – тело; $r_{\text{эф}}$ – эффективный радиус пор в наполнителе [5].

Если значение $h_{\text{т}}$ окажется меньше $h_{\text{н}}$, то также возникнет предельное состояние, при котором поры

наполнителя не до конца пропитаются связующим, что приведет к ухудшению качества препрега. Показатель критичности для этого случая представляется в виде:

$$y_{3,5} = \frac{h_{\text{н}}}{h_{\text{т}}}. \quad (22)$$

Качество процесса пропитки зависит и от его продолжительности τ . Она должна быть такой, чтобы связующее могло полностью проникнуть и заполнить все поры наполнителя. В противном случае возникшее предельное состояние не позволяет получить препрег необходимого качества. Показатель критичности для этого случая имеет вид:

$$y_{3,6} = \frac{\tau}{\tau_{\text{н}}}, \quad (23)$$

где $\tau_{\text{н}} = \frac{L \cdot \eta_{\text{т}} \cdot \Pi}{2 \cdot K_{\text{д}} \cdot P_{\text{д}}}$ – необходимая продолжительность

пропитки определяется выражением [7].

Для проникновения в поры стекловолоконного наполнителя связующее, находящееся в жидкой консистенции, должно обладать приемлемой смачиваемостью, т. е. способностью растекаться по поверхности наполнителя. Предельное состояние возникнет при отсутствии самопроизвольного растекания связующего. Показатель критичности этого состояния имеет вид [8]:

$$y_{3,7} = \frac{\sigma_{\text{ж.т}}}{\sigma_{\text{т.п}} \times \sigma_{\text{ж.п}} \cos \theta}, \quad (24)$$

где $\sigma_{\text{т.п}}$, $\sigma_{\text{ж.п}}$ – поверхностные натяжения на границах твердая фаза – пар и жидкость – пар.

В ходе нанесения на стекловолоконный наполнитель на поверхности возникает слой дисперсных частиц связующего. Он образуется в процессе отверждения. Чрезмерный расход связующего может привести к нерасчетному соотношению между компонентами в конструкционном композиционном материале и, как следствие, к неудовлетворительным качеству поверхности и однородности. Это предельное состояние оценивается показателем

$$y_{3,8} = \frac{2 \cdot Q}{(Q_{\text{н}} + \Delta_7) + (Q_{\text{н}} - \Delta_7)}, \quad (25)$$

где номинальный расход связующего с двухсторонним допуском установлен технологическим процессом в виде $Q_{\text{н}} \pm \Delta_7$.

Фактический расход связующего определяется выражением [9]:

$$Q = \frac{M_{\text{т}} \cdot V_1 \cdot q}{1 - q}, \quad (26)$$

где $M_{\text{т}}$ – поверхностная масса стекловолоконного наполнителя; V_1 – скорость протяжки ленты наполнителя; q – относительная толщина наноса связующего на поверхность наполнителя.

После пропитки получаемые препреги обычно уплотняют путем двухсторонней обкатки вертикальным каландром [10]. При прохождении препрега через межвалковый зазор δ увеличивается ширина ткани, но уменьшается ее пористость. Получение препрега с заданной пористостью, в конечном итоге, является главной целью выполнения технологического процесса. Предельное состояние здесь возникает в случае, когда препрег имеет неприемлемую пористость Π_k , отличную от установленной в технических условиях $\Pi_k \pm \Delta_8$. Показатель этого предельного состояния имеет вид:

$$\gamma_{3,9} = \frac{2 \times \Pi_k}{(\Pi_{kn} + \Delta_8) + (\Pi_{kn} - \Delta_8)}, \quad (27)$$

где $\Pi_k = \Pi \frac{h_l}{\delta} - \left(\frac{h_l}{\delta} - 1 \right) \frac{B_k}{B}$ – изменение пористости препрега [10]; B_k – ширина ленты препрега на линии, соединяющей центры валков.

Такова математическая модель качества процесса пропитки стекловолоконного наполнителя связующим. Как показала практика, она позволяет достаточно точно с использованием вычислитель-

ной техники количественно оценить качество процесса пропитки в условиях реального производства [5, 6, 11, 12].

Оценим его в случае пропитки стекловолоконного наполнителя двумя видами связующего эпоксидной смолы, имеющие марки ЭД-20 и ЭД-16. Определим наилучший вариант технологического процесса. При анализе считаем не критичным случай, когда значения показателей находятся в интервале от 0,2 до 1,0.

Допустим, непосредственными измерениями определены значения параметров для каждого из этих вариантов (табл. 1). С помощью математической модели получены значения показателей, представленные в табл. 2. Анализ этих результатов расчета с помощью математической модели позволил утверждать, что наиболее интенсивно на возникновение предельных состояний влияют недостаток массы связующего ($\gamma_{1,1}$), температура связующего ($\gamma_{1,4}$), его объемной пористостью ($\gamma_{2,1}$), заполнением межволоконного пространства связующим ($\gamma_{3,5}$) и временем пропитки ($\gamma_{3,6}$). При этом причиной возникновения предельных состояний может являться действие одновременно нескольких факторов.

Таблица 1. Параметры процесса пропитки наполнителя связующим

№ п/п	Обозначение параметра	Размерность	Значения для смол		№ п/п	Обозначение параметра	Размерность	Значения для смол	
			ЭД-20	ЭД-16				ЭД-20	ЭД-16
1	K_{Π}	–	1,10	1,15	30	$\theta_{\text{смф}}$	—°	95	
2	M_a	кг/м ²	170	180	31	$K_{\text{изв}}$	–	1,21	
3	$M_{\text{сп}}$	кг/м ²	150	160	32	$V_{\text{в}}$	–	0,72	
4	η_{Π}	Па·с	30	18	33	$V_{\text{вн}}$	–	0,75	
5	$T_{\text{н}}$	°К	293	298	34	Δ_5	–	0,1	
6	$T_{\text{к}}$	°К	302	300	35	$h_{\text{л}}$	м	0,005	
7	T_0	°К	288	295	36	$\eta_{\text{г}}$	Па·с	10	8
8	η_0	Па·с	28	16	37	$\Delta P_{\text{вн}}$	Па	1 500	
9	E_0	Дж/моль	$1,44 \cdot 10^{-5}$	$1,02 \cdot 10^{-5}$	38	$u_{\text{кн}}$	м/с	0,001	
10	R	Дж/(моль·К)	8,314	8,314	39	Δ_6	м/с	0,0001	
11	$T_{\text{пл}}$	°К	333	353	40	$S_{\text{уд}}$	м ²	0,06	
12	$\tau_{\text{пл}}$	сек.	36 000	30000	41	j	кг/м ³	2 600	
13	$\tau_{\text{пр}}$	сек.	20 000	15000	42	g	м/с ²	9,81	
14	$\rho_{\text{стр}}$	кг/м ³	1 700	1750	43	$h_{\text{н}}$	м	0,0001	
15	$\rho_{\text{нап}}$	кг/м ³	2 800		44	V	м/с	0,1	
16	$\Pi_{\text{н}}$	кг/м ³	700		45	$\sigma_{\text{жт}}$	Па	25	
17	Δ_1	кг/м ³	8		46	$r_{\text{эф}}$	м	0,000005	
18	$d_{\text{в}}$	м	$9 \cdot 10^{-6}$		47	$\sigma_{\text{тп}}$	Па	20	
19	$d_{\text{вн}}$	м	10^{-5}		48	$\sigma_{\text{жп}}$	Па	15	
20	Δ_2	м	10^{-7}		49	$Q_{\text{н}}$	кг/м ²	4	
21	$T_{\text{мп}}$	кг/м	850		50	Δ_7	кг/м ²	0,5	
22	$T_{\text{м}}$	кг/м	900		51	$M_{\text{т}}$	кг/м ²	80	
23	Δ_3	кг/м	8		52	B	м	0,2	
24	$\rho_{\text{н}}$	кг/м ³	1 600		53	V_1	м/с	0,002	
25	$\rho_{\text{нп}}$	кг/м ³	1 700		54	q	м	0,2	
26	Δ_4	кг/м ³	10		55	$\Pi_{\text{кн}}$	%	3	
27	$P_{\text{кап}}$	МПа	10		56	Δ_8	%	0,5	
28	$\sigma_{\text{жф}}$	Па	44	32	57	δ	м	0,015	
29	$d_{\text{кф}}$	м	0,000014		58	$B_{\text{к}}$	м	0,4	

Таблица 2. Показатели качества выполнения пропитки препрега

№ п/п	Показатель	Значения для смол		№ п/п	Показатель	Значения для смол	
		ЭД-20	ЭД-16			ЭД-20	ЭД-16
Связующее				Процесс пропитки			
1	$y_{1,1}$	0,013	0,989	1	$y_{3,1}$	0,918	0,918
2	$y_{1,2}$	0,330	0,556	2	$y_{3,2}$	0,000006	0,327
3	$y_{1,3}$	0,288	0,296	3	$y_{3,3}$	0,058	0,48
4	$y_{1,4}$	0,00003	0,833	4	$y_{3,4}$	0,915	0,873
5	$y_{1,5}$	0,500	0,500	5	$y_{3,5}$	0,0003	0,322
$Y_{1CP} = \frac{1}{5} \sum y_{1,i}$		0,226	0,635	6	$y_{3,6}$	0,0001	0,373
				7	$y_{3,7}$	0,808	0,808
$Y_1 = \min(y_{1,i}, i = 1,5)$		0,00003	0,0296	8	$y_{3,8}$	1,000	1,000
Наполнитель				9	$y_{3,9}$	0,732	0,729
1	$y_{2,1}$	0,000056	0,357	$Y_{3CP} = \frac{1}{9} \sum y_{3,i}$		0,492	0,648
2	$y_{2,2}$	0,900	0,900				
3	$y_{2,3}$	0,940	0,944	$Y_3 = \min(y_{3,i}, i = 1,9)$		0,0001	0,322
4	$y_{2,4}$	0,941	0,941				
$Y_{2CP} = \frac{1}{4} \sum y_{2,i}$		0,695	0,786	Y_{CP}		0,463	0,675
$Y_2 = \min(y_{2,i}, i = 1,4)$		0,000056	0,357				

В данном случае наиболее качественным является технологический процесс со связующим в виде эпоксидной смолы ЭД-16, для которого комплексный показатель оказывается наибольшим:

$$Y_{CP} = \frac{1}{19} (5 \cdot Y_{1CP} + 4 \cdot Y_{2CP} + 9 \cdot Y_{3CP}) = 0,675.$$

Именно при этом связующем значения всех показателей математической модели располагаются в некротичном интервале от 0,2 до 1,0, т. е. появление предельных состояний не ожидается.

На основании изложенного материала можно сделать следующие выводы.

1. Построенная математическая модель, основанная на анализе интенсивности проявления различных по природе свойств, позволяет количественно оценивать возникновение предельных состояний.
2. Доказано, что качество технологического процесса пропитки препрега определяется не только значениями показателей в заданном интервале, но и при равноудаленности по всем проявляемым свойствам.

Библиографические ссылки

1. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / М. Л. Кербер, В. М. Виноградов, Г. С. Головкин и др. – СПб. : Профессия, 2008. – 560 с.
2. Уразбахтин Ф. А., Уразбахтина А. Ю., Хмелева А. В. Критические ситуации при производстве и технической эксплуатации транспортно-пусковых контейнеров ракет / под ред. Ф. А. Уразбахтина. – Ижевск : Регуляр. и хаот. динамика, 2009. – 408 с.
3. Этих Ю. К., Бухаров С. В., Виноградов В. М. Методический подход к оптимизации технологических параметров процесса изготовления листовых упрочненных термопластов // Изв. ВолгГТУ. – 2010. – Т. 4, № 4. – С. 65–69.
4. Уразбахтин Ф. А., Уразбахтина А. Ю., Репко А. В. Динамика критических ситуаций в алмазном шлифовании. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2005. – 176 с.

5. Воробьев В. А. Полимерные теплоизоляционные материалы. – М. : Стройиздат, 1972. – 320 с.

6. Комков М. А., Тарасов В. А. Технология намотки композиционных конструкций ракет и средств поражения. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. – 431 с.

7. Кинетика процессу просочивания волоконистых наповнювачів композиціями епоксидних полімерів / О. С. Колосов, В. І. Сівецький, Л. А. Кричківська, О. П. Колосова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 2, № 5. – URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/kinetika-protsesu-prosochuvannya-voloknistih-napovnyuvachiv-kompozitsiyami-epoksidnih-polimeriv> (дата обращения: 03.12.2013).

8. Сафин В. Н. Композиционные материалы : текст лекций. – Челябинск : ЮУрГУ, 2010. – 36 с.

9. Новые решения в технологии изготовления препрегов для панелей интерьера / С. В. Стрельников, В. И. Петухов, В. И. Постнов, Н. И. Швеца // Изв. Сам. науч. центра Рос. акад. наук. – 2011. – Т. 13, № 4. – С. 498–507. – URL: http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2011/2011_4_498_507.pdf (дата обращения: 03.12.2013).

10. Необердин Ю. А., Слободинская Т. В. О построении модели пропитки пористого листа связующим в зазоре двухвалкового вертикального каландра // Изв. С.-Петерб. технол. ин-та (техн. ун-та). – 2012. – № 17. – С. 83–87. – URL: <http://science.spb.ru/files/IzvetiyaTI/2012/17/Full/files/assets/basic-html/page84.html> (дата обращения: 03.12.2013).

11. Харинова Ю. Ю., Уразбахтин Ф. А. Принципы построения математической модели нанесения теплозащитных покрытий на поверхности ракет методом напыления // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке – 2013 : сб. науч. тр. – Ижевск, Изд-во ИжГТУ, 2013. – С. 254–255. – URL: <http://sconf.istu.ru/docs/sbornik.pdf> (дата обращения: 03.12.2013).

12. Уразбахтин Ф. А., Харинова Ю. Ю., Рыбин А. Н. Принципы построения математической модели нанесения теплозащитных покрытий на поверхности многоступенчатых ракет // 11-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2012», Москва, МАИ, 13–15 нояб. 2012 г. : тез. докл. – СПб. : Принт-салон, 2012. – С. 159–160. – URL: <http://kak.znate.ru/docs/index-63336.html>; <http://kak.znate.ru/download/docs-63336/63336.doc> (дата обращения: 03.12.2013).

* * *

F. A. Urazbakhtin, DSc in Engineering, Professor, Votkinsk branch of Kalashnikov Izhevsk State Technical University
J. Yu. Kharinova, Post-graduate, Votkinsk branch of Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Mathematical model of impregnation of the prepreg for the manufacture of fibrous polymer composites in construction materials

We propose a mathematical model of the process of impregnation of prepreg glass fiber, allowing to define the appearance of limiting conditions, and also assess the quality of execution of impregnation process of prepreg fibrous structural composite materials.

Keywords: impregnation, mathematical model, limiting condition, indicator of severity

Получено: 02.09.13

УДК 658.511

Р. Л. Фоминых, кандидат технических наук, доцент;
Воткинский филиал
Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова
М. В. Ельцов, главный специалист;
ЗАО «Ижевский нефтяной научный центр» ОАО «НК „Роснефть“»
Н. С. Сулоев, аспирант
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РАЗРАБОТКЕ ПЛАНОВ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ МОДЕРНИЗАЦИИ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ПО ПРОИЗВОДСТВУ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОЙ ПРОДУКЦИИ ГРАЖДАНСКОГО НАПРАВЛЕНИЯ

Представлен положительный опыт восстановления пропущенных данных при проведении исследований по формированию управляемых факторов (показателей организационно-технического уровня предприятия), оказывающих наибольшее влияние на реализацию приоритетных целевых программ развития предприятия, направленных на обеспечение конкурентоспособности гражданской продукции высокотехнологичных предприятий машиностроительного комплекса.

Ключевые слова: машиностроение, организационно-технический уровень, гражданская продукция, эффективность, восстановление пропущенных данных выборки

Как отмечается в прогнозе социально-экономического развития России до 2030 г. (июль 2013 г.) [1] АНО «Институт проблем естественных монополий», на итоговый сценарий развития экономики существенное влияние оказывают бюджетные расходы: чем выше расходы бюджета, тем выше темпы роста ВВП и промышленного производства. Так, по итогам первого полугодия 2013 г. наглядно отмечается текущая степень зависимости экономики от динамики бюджетных расходов.

Данные итоги могут говорить о полном субсидировании промышленности России из бюджетных фондов, включая и оборонзаказы.

Следует также упомянуть выступление О. В. Сиенко, генерального директора ОАО «Научно-производственная корпорация „Уралвагонзавод“», на международной выставке и форуме промышленности и инноваций ИННОПРОМ-2013 12 июля 2013 г. В частности, он отметил, что несмотря на тот факт, что «Уралвагонзавод» сейчас находится на подъеме (благодаря заказам Минобороны РФ на 6 млрд руб. [2]), ряд обстоятельств вызывает беспокойство. По мнению Сиенко, ни существующая в стране инфраструктура, ни промышленность, ни технологии к полноценной конкуренции в рамках ВТО не готовы. Образно выражаясь, страна ползла в омут очертя голову, к тому же внутренний потребитель сейчас

стремится купить как можно дешевле, невзирая на низкое качество, что также не позволяет полноценно конкурировать с недобросовестными производителями.

Данные факты говорят об актуальности для промышленных предприятий поиска механизмов внутреннего управления, способных обеспечить конкурентоспособность производства гражданской продукции на внутреннем рынке, а по самым оптимистическим планам – и на внешних рынках Европы, Азии и Северной Америки.

В случае запуска объективных процессов на мировом рынке энергоресурсов возможно уменьшение объемов госзаказов, что приведет к полной гибели промышленных предприятий машиностроения, находящихся на данный момент на «игле» госзаказов. До 30 % работающего сейчас трудоспособного населения России так или иначе связано с такими предприятиями [3], и оно окажется неготовым к таким переменам сценария 90-х годов прошлого века.

Понимая актуальность данного вопроса, авторы статьи попытались разработать методические указания к разработке планов организационно-технической модернизации высокотехнологичных предприятий машиностроительного комплекса. Целью данной разработки является формирование управляемых факторов (показателей организационно-технического уровня