

УДК 678

DOI 10.17223/19988621/39/9

В.А. Мартынов, К.А. Пасечник, А.Ю. Власов**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ПРОПИТКИ
НИЗКОВЯЗКИМ ОРГАНИЧЕСКИМ СВЯЗУЮЩИМ
УГЛЕРОДНОЙ АРМИРУЮЩЕЙ ТКАНИ САТИНОВОГО ПЛЕТЕНИЯ¹**

Рассмотрен вопрос порообразования в процессе пропитки низковязким связующим армирующего слоя углеродной ткани четырехремизного сатинового плетения. Показаны параметры, влияющие на тип и размеры, образующихся пор. Проведена оценка капиллярных сил в зависимости от архитектурных параметров тканого наполнителя. Определен оптимальный интервал скоростей пропитки армирующего слоя при трансферном формовании изделия из полимерного композиционного материала, позволяющий минимизировать порообразование в структуре получаемого ламината.

Ключевые слова: космическая техника, полимерные композиционные материалы, трансферное формование, пористость, порообразование, капиллярное число.

При мелкосерийном производстве прецизионных изделий и элементов конструкций сложной формы из полимерных композиционных материалов для космической техники эффективен метод трансферного формования (Resin Transfer Molding – RTM). Для обеспечения надлежащего уровня качества выпускаемых изделий данным методом необходима разработка надежного технологического процесса. В первую очередь необходимо определить входные параметры процесса на основе используемых исходных материалов, границы допустимых изменений этих параметров для достижения определенного значения выбранного выходного параметра [1].

При выборе типа армирующего материала как одного из входных параметров руководствуются рядом требований, таких, как обеспечение необходимого уровня прочностных показателей детали, простота и минимальная трудоемкость переработки, возможность изготовления деталей сложной формы. Ввиду своей технологичности, обеспечивающей оптимальный баланс между стоимостью материала и простотой его переработки, в настоящее время для RTM-приложений часто применяются тканые волокнистые материалы. Повышенный интерес при изготовлении деталей сложной формы проявляется к армирующим тканям четырехремизного сатинового плетения, обусловленный их универсальностью и эффективностью решения многих задач, ввиду сохранения оптимального баланса между прочностными свойствами углеродных нитей и технологичностью переработки. Из-за пористой структуры тканей композиционный материал будет также обладать определенной величиной пористости. В современных работах [2, 3] принято классифицировать поры в ламинате в зависимости от их размера и принимать величину пористости за основной выходной параметр – параметр качества композиционной детали, поскольку увеличение содержания пор приводит к существенной деградации механи-

¹ Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Российской Федерации, государственный контракт №2.G2531.0043.

ческих свойств конечного изделия [4]. Различают микропоры величиной от 10 до 50 мкм, образующиеся между элементарными волокнами нити, мезопоры величиной 0.5–1.0 мм, расположенные между сплетенными нитями и макропоры, вызванные глобальными нарушениями процесса пропитки, неправильным проектированием технологической оснастки или ее дефектами (рис. 1).



Рис. 1. Образование пор в ламинате при дефектах оснастки

Пористость может быть снижена путем оптимизации процесса пропитки с помощью модифицированного капиллярного числа [5, 6]. Практически вопрос решается проведением большого числа экспериментов и измерений, что сказывается на надежности получаемых результатов. Альтернативный путь – это применение аналитических моделей, связывающих тип плетения, структуру пористости, содержание волокна тканых материалов с их проницаемостью и объясняющих математически возможность формирования пор.

Современные коммерческие тканые материалы обладают существенными структурными отличиями, поэтому каждая ткань представляет собой набор собственных параметров, отличных от других тканей, таких, как пористость и проницаемость армирующего пакета. В этой связи целью данной работы являлось исследование ткани четырехремизного сатинового плетения и определение оптимальных скоростей процесса пропитки армирующего слоя, отвечающих минимальной пористости ламината, вычисленных через архитектурные параметры тканого наполнителя.

Теория образования пор в процессе пропитки армирующего слоя рассматривает ткань как совокупное множество элементарных ячеек, подразделяющихся на два типа доменов. К внутринитевому домену относится пространство внутри нити и пространство между нитью и поверхностью технологической оснастки; межнитевой домен образован пространством при переплетении нитей основы и утка. В течение процесса подачи связующего в полость технологической оснастки вязкие силы доминируют в мезопорах, в то время как капиллярные силы определяют взаимодействие ткани со связующим компонентом на микроуровне, поскольку капиллярное давление обратно пропорционально размеру пор. Скорости пропитки

внутринитевого и межнитевого доменов определяют тип образующихся пор. В случае превалирования скорости пропитки внутринитевого домена над межнитевой скоростью воздух захватывается между нитями ткани – образуются преимущественно мезопоры, в противоположном случае – при доминировании скорости пропитки межнитевого домена образуются микропоры [7]. Полученное с помощью оптического микроскопа изображение ламината (рис. 2) иллюстрируют образование мезопор в области переплетения нитей основы и утка.

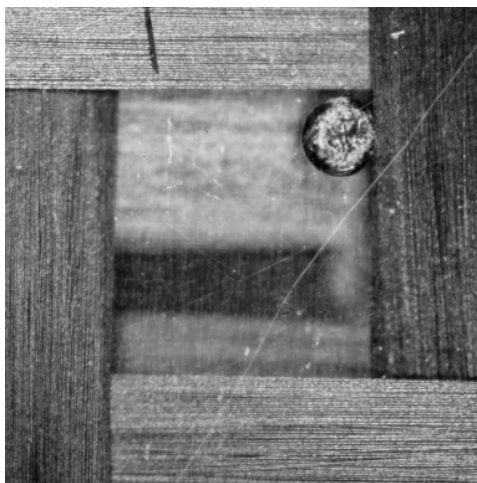


Рис. 2. Образование мезопоры в области переплетения нитей основы и утка

При выполнении вычислений принимают допущение о равномерной пористости домена. Скорость пропитки связующим вдоль внутринитевого u_L и межнитевого U доменов определяется уравнением Дарси с учетом капиллярного характера движения жидкости в пористой среде для внутринитевого домена:

$$u_L = -\frac{k_L}{\mu\Phi_L'} \left(\frac{dP}{dn} - \frac{P_{c,L}}{l_L} \right); \quad (1)$$

$$U = -\frac{K_L}{\mu\Phi_L} \left(\frac{dP}{dn} \right), \quad (2)$$

где l_L – длина домена вдоль направления пропитки, Φ_L' – пористость домена, $P_{c,L}$ – капиллярное давление, K_L – проницаемость межнитевого домена, Φ_L – пористость тканого материала, dP/dn – градиент давления.

Для оценки скорости импрегнирования доменов необходимо знать проницаемость каждого из них. При течении потока связующего вдоль внутринитевого домена k_L и перпендикулярно домену k_T проницаемость пористой среды соответствует уравнениям

$$k_T = \frac{(h_T k_{\text{axial}} + h_L k_{\text{cross}})}{H}, \quad k_L = \frac{(h_L k_{\text{axial}} + h_T k_{\text{cross}})}{H}, \quad (3)$$

где H – высота полости технологической оснастки для укладки армирующего пакета, h_L – толщина нити основы, h_T – толщина нити утка, k_{axial} , k_{cross} – проницаемо-

сти нити при движении фронта потока в направлении вдоль нити и перпендикулярно к ней соответственно.

Проницаемости нитей определяются исходя из модели Гебарта [8] как функции объемного содержания волокна, принимая форму упаковки элементарных волокон в нити как гексагональную

$$k_{\text{axial}} = \frac{8r^2}{C_{\text{axial}}} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2}, \quad k_{\text{cross}} = C_{\text{cross}} r^2 \left(\sqrt{\frac{V_{f\text{max}}}{1-\phi}} - 1 \right)^{5/2}, \quad (4)$$

где $C_{\text{axial}} = 53$, $C_{\text{cross}} = \frac{16}{9\pi\sqrt{6}}$, $V_{f\text{max}} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \cdot \phi$, ϕ – пористость нити, r – радиус волокна.

Пористость внутринитевого домена, необходимая для расчета скорости пропитки, определяется следующим образом:

$$\phi'_L = 1 - \frac{h_L}{H} (1 - \phi_L), \quad (5)$$

где ϕ_L – пористость нити основы, h_L – высота нити основы, H – высота полости оснастки.

Капиллярное давление ($P_{c,L}$), определяется из уравнения Юнга – Лапласа и записывается как

$$P_{c,L} = \frac{2\gamma \cos \theta}{r_{c,L}}, \quad (6)$$

где γ – поверхностное натяжение связующего, θ – контактный угол между связующим и волокном, $r_{c,L}$ – капиллярный радиус, определяемый как

$$r_{c,L} = \frac{\phi'_L}{(1-\phi'_L)} r.$$

Доля пор в ламинате, вызванная захватом воздуха в межнитевом домене, может быть определена из выражения, полученного авторами [7], исходя из представлений о доменной структуре ткани:

$$V_f = \left[1 - \frac{K_L}{\Phi_L} \left[\left(\frac{\phi'_L}{k_L} + \frac{\phi'_T}{k_T} \right) - \frac{K_L}{\mu \Phi_L U} \left\{ \frac{\phi'_L P_{c,L}}{k_L L_L} \ln \left(1 + \frac{\mu \Phi_L U L_L}{K_L P_{c,L}} \right) + \frac{\phi'_T P_{c,T}}{k_T (L_T/2)} \log \left(1 + \frac{\mu \Phi_L (L_T/2) U}{K_L P_{c,T}} \right) \right\} \right] \right] \Phi, \quad (7)$$

где Φ – доля межнитевого домена в структуре ткани.

В качестве исследуемого материала в работе использовалась углеродная ткань артикула 3198 (Porcher Ind., Франция) с плетением 4HS – четырехремизный сатин, данные по геометрии ткани были получены с использованием оптического микроскопа. Расстояние между нитями и ширина нитей определялись на не менее 5 участках ткани, для расчетов использовались средние значения. На лицевой поверхности сатина преобладают уточные нити. В четырехремизном сатине каждая основная нить выходит только один раз на лицевую поверхность, затем уходит под три уточные нити. Каждая нить ткани состоит из 3000 штук элементарных волокон диаметром 7 мкм каждая.

Строение четырехремизного сатинового переплетения предусматривает наличие в каждой точке ткани в направлении толщины, за исключением областей между переплетениями, по две нити – основы и утка. При изготовлении детали толщиной 0.001 м^2 , состоящей из 5 слоев ткани, в направлении толщины расположено 10 нитей, поэтому на одну нить приходится 0.0001 м^2 пространства полости технологической оснастки.

Принимая, что элементарные волокна в нити упакованы в гексагональную структуру, рассчитана площадь элементарного волокна и нити с необходимым числом волокон. Минимальная площадь, которую может занимать нить ткани 3198, равна $1.27\cdot 10^{-7}\text{ м}^2$. Исходя из реальных размеров нити и допуская, что нить имеет прямоугольное сечение, определена реальная площадь нити равная $1.85\cdot 10^{-7}\text{ м}^2$. Все измеренные и расчетные параметры приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Измеренные геометрические параметры армирующей ткани

№ п/п	Измеренная величина	Значение
1	Ширина нити основы A , м	$1.88\cdot 10^{-3}$
2	Ширина нити утка B , м	$2.03\cdot 10^{-3}$
3	Диаметр волокна r_f , м	$7.00\cdot 10^{-6}$
4	Площадь всех волокон в нити S_f , м^2	$1.27\cdot 10^{-7}$

Таблица 2

Вычисленные геометрические параметры армирующей ткани

№ п/п	Вычисленная величина	Значение
1	Площадь волокна S_f , м^2	$3.85\cdot 10^{-11}$
2	Площадь нити основы S_{L_s} , м^2	$1.85\cdot 10^{-7}$
3	Площадь нити утка S_{T_s} , м^2	$2.02\cdot 10^{-7}$
4	Пористость нити основы ϕ_L	0.38
5	Пористость нити утка ϕ_T	0.43
6	Толщина нити основы h_{L_s} , м	0.0001
7	Толщина нити утка h_{T_s} , м	0.0001
8	Проницаемость нити основы при движении потока вдоль основы k_{axial} , м^2	$2.53\cdot 10^{-13}$
9	Проницаемость нити утка при движении потока вдоль утка k_{axial} , м^2	$4.56\cdot 10^{-13}$
10	Проницаемость нити основы при движении потока перпендикулярно основе k_{cross} , м^2	$3.50\cdot 10^{-12}$
11	Проницаемость нити утка при движении потока перпендикулярно утку k_{cross} , м^2	$4.34\cdot 10^{-12}$
12	Проницаемость домена при движении потока вдоль нити основы k_L , м^2	$1.76\cdot 10^{-13}$
13	Проницаемость домена при движении потока вдоль нити утка k_T , м^2	$2.56\cdot 10^{-13}$
14	Пористость внутринитевого домена; основа ϕ'_L и уток ϕ'_T	0.69 0.72
15	Капиллярный радиус; основа $r_{c,L}$ и уток $r_{c,T}$, м	$7.72\cdot 10^{-6}$ $8.80\cdot 10^{-6}$
16	Капиллярное давление; основа $P_{c,L}$ и $P_{c,T}$ уток, Па	$8.24\cdot 10^3$ $7.23\cdot 10^3$

Различие геометрических параметров нитей основы и утка ткани 3198 обусловлено особенностями процесса ткачества. Отклонение геометрических параметров ткани от теоретических, модельных представлений оказывает влияние на процесс пропитки материала и образование пор в структуре ламината. С целью получения оптимальной скорости пропитки ламината были изготовлены экспериментальные образцы материала с соотношением наполнитель – матрица 55.45 – 47.55 % и определена проницаемость армирующего материала, которая составила $6.51 \cdot 10^{-10}$ м. Определение проницаемости сводилось к регистрации времени и положения фронта связующего при пропитке армирующего материала вдоль нитей основы. При этом вязкость связующего не изменялась в течение времени пропитки и составляла 0.1 Па·с. Процесс пропитки проводился при градиентах давлений от $0.85 \cdot 10^5$ до $0.36 \cdot 10^5$ Па. По выражению (7) оценена теоретическая доля возможной пористости и построена зависимость скорости пропитки от содержаний пор в ламинате, показанная на рис. 3.

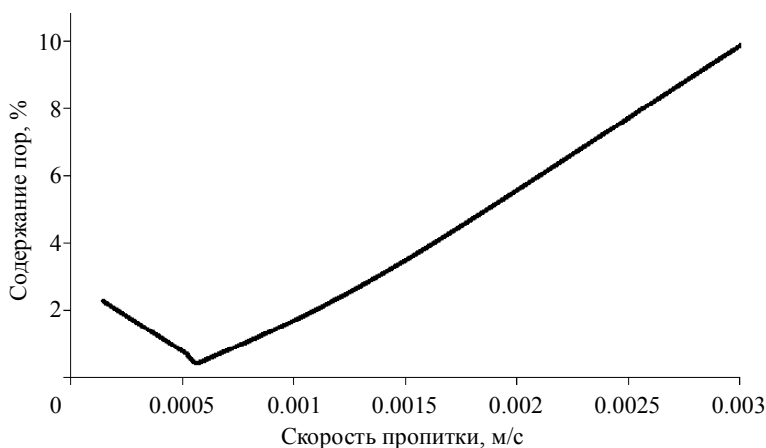


Рис. 3. Зависимость образования пористости в структуре ламината при различных скоростях пропитки

Таким образом, теоретически минимальную пористость возможно получить при поддержании скорости пропитки на уровне $5.7 \cdot 10^{-4}$ м/с, что соответствует ранее заявленным значениям для пропитки других материалов [9]. Изготовленный ранее образец, для которого справедлива данная скорость, также обладал минимальной пористостью. Из вышесказанного следует, что задача получения качественной пропитки материала сводится к обеспечению расчетных скоростей пропитки материала путем поддержания однородности укладки армирующего материала, то есть поддержаний однородной проницаемости по всей геометрии преформы, а также путем изготовления точных технологических оснасток, позволяющих проводить процесс пропитки без изменения их форм и размеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Власов А.Ю., Пасечник К.А., Мартынов В.А. Определение диапазонов изменения ключевых параметров, обеспечивающих стабильность технологического процесса производства изделий сложной формы из полимерных композиционных материалов методом RTM // Вестник СибГАУ. 2014. № 4(56). С. 202–208.

2. Yanga B., Jina T., Bia F., et al. Influence of fabric shear and flow direction on void formation during resin transfer molding // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2015. V. 68. P. 10–18.
3. Ravey C., Ruiz E., Trochu F. Determination of the optimal impregnation velocity in Resin Transfer Molding by capillary rise experiments and infrared thermography // *Composites. Science and Technology*. 2014. V. 99. P. 96–102.
4. Lee C.-L., Wei K.-H. Resin transfer molding (RTM) process of a high performance epoxy resin. II: Effects of process variables on the physical, static and dynamic mechanical behavior // *Polymer Engineering & Science*. 2000. V. 40. I. 4. P. 935–943.
5. Leclerc J.B., Ruiz E. Porosity reduction using optimized flow velocity in Resin Transfer Molding // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2008. V. 39. I. 12. P. 1859–1868.
6. LeBel F., Fanaei A.E., Ruiz É., et al. Prediction of optimal flow front velocity to minimize void formation in dual scale fibrous reinforcements // *Intern. J. Material Forming*. 2014. V. 7. I. 1. P. 93–116.
7. Matsuzakia R., Setob D., Todorokib A., et al. Void formation in geometry–anisotropic woven fabrics in resin transfer molding // *Advanced Composite Materials*. 2014. V. 23. No. 2. P. 99–114.
8. Gebart BR. Permeability of unidirectional reinforcements for RTM // *J. Composite Materials*. 1992. No. 26(8). P. 1100–1133.
9. Park C.H., Lee W.I. Modeling Void Formation and Unsaturated Flow in Liquid Composite Molding Processes: a Survey and Review // *J. Reinforced Plastics and Composites*. 2011. V. 30. P. 957–977.

Статья поступила 25.12.2015 г.

Martinov V. A., Pasechnik K. A., Vlasov A. Yu. DETERMINING THE RATES OF IMPREGNATION BY A LOW-VISCOUS ORGANIC BINDER FOR A CARBON REINFORCING SATIN WEAVE FABRIC

DOI 10.17223/19988621/39/9

In this article, we consider the question about the pore formation during impregnation of a reinforcing layer of a carbon four-shaft satin weave fabric by a low-viscous organic binder. Parameters having an effect on the type and dimensions of the forming pores, such as material impregnation rate and quality of production accessories, are shown. The capillary forces arising in the process of impregnating the carbon fabric by an organic binder are estimated depending on architectural parameters of fabric threads. These parameters were measured by an optical microscope. To find the permeability of the carbon fiber based fabric filler, experiments establishing the impregnation time for a certain length of the reinforcing material at different pressures were carried out. The optimum range of the reinforcing layer impregnation rates during the transfer molding of products made of a polymer composition material has been determined. This interval of the impregnation rates allows minimizing the formation of pores in the structure of the resulting laminate. The optimum rates were determined using the well-known theory about the intra- and interthread domains and estimation of the optimum impregnation time proceeding from times of filling the intra- and interthread domains. The article is of interest for the development, design, and implementation of the technological process of manufacturing complex shape details of polymer composition materials by transfer molding with the use of such materials.

Keywords: space technology, polymer composites, transfer molding, porosity, evaporation, capillary number.

MARTINOV Vasily Aleksandrovich (Engineer; Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev).
E-mail: martynov.vasily@gmail.ru

PASECHNIK Kirill Arnol'dovich (Engineer; Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev).

E-mail: kir.nik@mail.ru.

VLASOV Anton Yur'evich (Candidate of Physics and Mathematics, Assoc. Prof.; Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev).

E-mail: vlasov.anton@gmail.com.

REFERENCES

1. Vlasov A.Yu., Pasechnik K.A., Martynov V.A. Opredelenie diapazonov izmeneniya klyuchevykh parametrov, obespechivayushchikh stabil'nost' tekhnologicheskogo protsessa proizvodstva izdeliy slozhnoy formy iz polimernykh kompozitsionnykh materialov metodom RTM. *Vestnik SibGAU*, 2014, no. 4(56), pp. 202–208. (in Russian)
2. Yanga B., Jina T., Bia F., et al. Influence of fabric shear and flow direction on void formation during resin transfer molding. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, vol. 68, pp. 10–18.
3. Ravey C., Ruiz E., Trochu F. Determination of the optimal impregnation velocity in Resin Transfer Molding by capillary rise experiments and infrared thermography. *Composites. Science and Technology*, 2014, vol. 99, pp. 96–102.
4. Lee C.-L., Wei K.-H. Resin transfer molding (RTM) process of a high performance epoxy resin. II: Effects of process variables on the physical, static and dynamic mechanical behavior. *Polymer Engineering & Science*, 2000, vol. 40. I. 4, pp. 935–943.
5. Leclerc J.B., Ruiz E. Porosity reduction using optimized flow velocity in Resin Transfer Molding. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2008, vol. 39. I. 12, pp. 1859–1868.
6. LeBel F., Fanaei A.E., Ruiz É., et al. Prediction of optimal flow front velocity to minimize void formation in dual scale fibrous reinforcements. *Intern. J. Material Forming*, 2014, vol. 7. I. 1, pp. 93–116.
7. Matsuzakia R., Setob D., Todorokib A., et al. Void formation in geometry–anisotropic woven fabrics in resin transfer molding. *Advanced Composite Materials*, 2014, vol. 23, no. 2, pp. 99–114.
8. Gebart BR. Permeability of unidirectional reinforcements for RTM. *J. Composite Materials*, 1992, no. 26(8), pp. 1100–1133.
9. Park C.H., Lee W.I. Modeling Void Formation and Unsaturated Flow in Liquid Composite Molding Processes: a Survey and Review. *J. Reinforced Plastics and Composites*, 2011, vol. 30, pp. 957–977.