

2 Щербина Л.А., Геллер Б.Э., Геллер А.А. Априорная оценка некоторых физико-химических свойств пленко- и волокнообразующих полимеров. – Могилев: УО "МГУП", 2008. – 136 с.

3 Мак-Вини Р., Сатклиф Б. Квантовая механика молекул. – М.: Мир, 1972. – 380 с.

4 Дьюар М. Теория молекулярных орбиталей в органической химии. – М.: Мир, 1972. – 590 с.

5 Askadskii A. A. Computational Materials Science of Polymers. – Cambridge International Science Publishers: 2003. – 696 p.

УДК 678.027

Д. С. Гончарёнок, магистрант; Е. И. Кордикова доц., канд. техн. наук;
А. В. Спиглазов, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

ГИБРИДНЫЕ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТЕРМОРЕАКТИВНЫХ СВЯЗУЮЩИХ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В настоящее время на мировом рынке наблюдается увеличение объемов применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в строительной индустрии. Применение ПКМ в строительстве позволяет уменьшить массу строительных конструкций, повысить коррозионную стойкость и стойкость к воздействию неблагоприятных климатических факторов, продлить межремонтные сроки, выполнять ремонт и усиление конструкций с минимальными затратами ресурсов и времени [1]. Основными областями применения ПКМ в строительстве являются: арматура и гибкие связи, ограждения, сэндвич-панели, элементы мостовых конструкций.

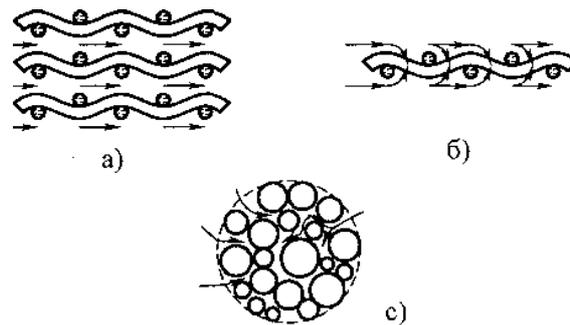
В настоящее время все более важным становится сокращение стоимости изготовления и технического обслуживания композитных конструкций. Решение этой задачи заключается в сочетании новых концепций проектирования конструкций из ПКМ и экономичных методов их производства.

Одним из таких относительно новых методов является технология вакуумной инфузии, которая позволяет комбинировать различные виды армирующих материалов для создания гибридных структур и тем самым повысить эффективность использования композиционных материалов в нагруженных элементах конструкций строительного назначения. В качестве непрерывного волокнистого армирующего наполнителя применяют стеклоткани различного типа, а в качестве полимерной матрицы – полиэфирные, эпоксидные и винилэфирные смолы.

В реализованных до настоящего времени промышленных вариантах технологии вакуумной инфузии используется ограниченное количество наполнителей без учета эффективного использования вари-

антов укладки. Известно, что тканые наполнители являются упругими пористыми материалами, при формовании они подвергаются деформированию, при этом изменяется толщина пакета, его пористость и, соответственно, степень наполнения в готовом изделии.

Поскольку в процессе пропитки уплотненного пакета связующее заполняет все межволоконное пространство (рисунок 1), то можно принять, что относительная объемная пористость пакета Π и относительное объемное содержание связующего β в материале имеют одинаковое значение.



а – межслоевое течение; б – пропитка слоя ткани; с – пропитка нити

Рисунок 1 – Схема течения связующего при пропитке тканых наполнителей

При течении линейно-вязкой (ньютоновской) жидкости через пористую среду в направлении оси x зависимость между расходом q_x и градиентом давления $\frac{dp}{dx}$ выражается соотношением, известным как закон Дарси:

$$q_x = -\frac{K_x}{\mu} \left(\frac{dp}{dx} \right), \quad (1)$$

где K_x – коэффициент проницаемости среды в направлении оси x ; μ – ньютоновская вязкость. Знак «минус» означает, что течение происходит в направлении, противоположном вектору градиента давления.

Коэффициент проницаемости K_i в двух направлениях определяли по результатам эксперимента в соответствии с формулой:

$$K_i = \frac{\mu \cdot v_i \cdot l_i}{\Delta p}, \quad (2)$$

где μ – вязкость модельной жидкости, Па·с; v_i – скорость перемещения фронта жидкости в направлении x или y ; l_i – длина участка в направлении x или y ; Δp – перепад давлений. Осредненные результаты эксперимента представлены в таблице.

Математическое моделирование процесса пропитки проводили в системе ANSYS, которая позволяет достоверно прогнозировать параметры процессов. Для приближенного прогнозирования необходи-

мо создать геометрию пустот с учетом их вероятного распределения по объему пакета. Для описания структуры принят ряд упрощений: материал моделируется как однородное по объему тело с анизотропией свойств по трем направлениям: основа, уток и перпендикулярно слою; свойства материала неизменны в процессе течения (структура ткани постоянна).

Установлено [2, 3], что течение жидкости при заполнении пористой среды хорошо описывается уравнением теплопроводности (3), которое по структуре соответствует закону течения жидкости (4).

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \ddot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_\phi \phi) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x C_\phi \phi) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v_y C_\phi \phi) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z C_\phi \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S_\phi \quad (4)$$

где K_x, K_y, K_z – коэффициенты теплопроводности по направлениям; T – температура; $\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z$ – коэффициенты переноса массы по направлению; ρ – плотность материала; c – удельная теплоемкость; μ – вязкость материала; σ – коэффициент проницаемости среды.

При использовании модели теплопроводности необходимо осуществить адекватную замену коэффициентов. Вместо плотности ввели коэффициент вязкости, коэффициенты теплопроводности заменили коэффициентами проницаемости среды по направлениям, а удельную теплоемкость – коэффициентом уплотнения материала (отношение пористости материала к давлению).

Результаты решения по методу конечных элементов представлены в таблице.

Таблица – Результаты эксперимента и расчета

Степень наполнения $P_{\text{нап}}$	Давление пропитки p , МПа	Вязкость связующего μ , Па·с	Коэффициент проницаемости, м^2			
			эксперимент		расчет	
			вдоль основы, K_x	вдоль утка, K_y	вдоль основы, K_x	вдоль утка, K_y
0,6	0,1	1,12	$1,25 \cdot 10^{-11}$	$5,59 \cdot 10^{-12}$	$12,5 \cdot 10^{-12}$	$5,6 \cdot 10^{-12}$
0,55	0,1	1,12	$1,84 \cdot 10^{-11}$	$9,07 \cdot 10^{-12}$	$18,4 \cdot 10^{-12}$	$9,1 \cdot 10^{-12}$
0,50	0,1	1,12	$2,36 \cdot 10^{-11}$	$9,77 \cdot 10^{-12}$	$23,6 \cdot 10^{-12}$	$9,8 \cdot 10^{-12}$
0,55	0,1	0,40	$1,35 \cdot 10^{-10}$	$8,80 \cdot 10^{-11}$	$135 \cdot 10^{-12}$	$88 \cdot 10^{-12}$

Сравнение полученных результатов эксперимента и моделирования показывает хорошую корреляцию по коэффициенту проницаемости и глубине пропитки. Расхождение составляет 1–7% в зависимости от исходного материала, что позволяет применять численные методы для расчета параметров процесса пропитки при изготовлении габаритных изделий (рисунок 2).

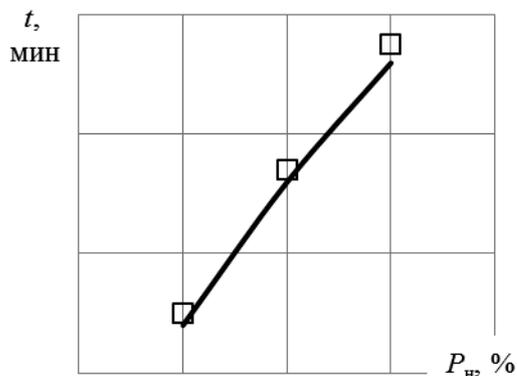


Рисунок 2 – Длительность пропитки на расстояние 70 мм по основе в зависимости от степени наполнения: точки – экспериментальные данные, линия – расчет

В работе изучено поведение стекловолоконистого материала под вакуумом и получены зависимости изменения пористости и содержания наполнителя от давления уплотнения. Показано, что коэффициенты проницаемости системы не остаются постоянными и зависят от таких факторов, как направление течения (основа, уток), время течения, степень наполнения, давление и вязкость жидкости.

Использование упрощенных методик расчета и прогнозирования, а также внедрение компьютерных средств моделирования процессов пропитки в настоящее время актуально и позволяет упростить экспериментальное оборудование по определению показателей структуры тканых материалов и ее проницаемости для связующих смол; существенно снизить продолжительность подготовительных работ; создать возможность прогнозирования параметров процесса пропитки для изделий сложной пространственной формы.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Применение полимерных композиционных материалов в строительных конструкциях / Ф. С. Власенко, А. Е. Раскутин // Электронный научный журнал "ТРУДЫ ВИАМ". – 2013, № 8
- 2 Gutowski T.G. e.s. The consolidation of laminate composites // J. Composite Materials. - 1987.-Vol. 21, №2.-P. 172-188.
- 3 Gibson A.G. Modification of Darsy's law to model mould interface effects in composites processing // Composite Manufacturing. - 1992, Vol. 3, № 2, P. 113-118.