ЛИТЕРАТУРА

1. Симон Ж., Андре Ж.-Ж. Молекулярные полупроводники. М.: Мир, 1988.
2. Адсорбционно-резистивные свойства фталоцианина меди, диспергированного в полимерную матрицу / А. Е. Почтенный, Д. И. Сагайдак, Г. Г. Федорук, А. В. Мисевич // Физика твердого тела. – 1998. – Т. 40, № 4. – С. 773–775.
3. Wright J. D. Gas adsorption and conductivity of phthalocyanines // Progr. Surf. Sci. – 1989. – Vol. 31. – P. 1–60.

УДК 620.18:678.5.06

А.Л. Наркевич, инженер; В.П. Ставров, профессор

ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОСТРУКТУРЫ КОМПОЗИТОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ ПУЛТРУЗИОННОЙ ПРОПИТКОЙ СТЕКЛОРОВИНГА РАСПЛАВОМ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ПОЛИМЕРА

The characteristics of inhomogeneous structure of a composite received by pultrusion impregnation of a glass roving with the thermoplastic polymer melt are investigated. The dependence of these characteristics from of a fibres tension, from viscosity, pressure and submission method of polymer melt is shown.

Пултрузионная пропитка непрерывных волокнистых наполнителей расплавами термопластичных полимеров позволяет получать высокопрочные композиты однонаправленной структуры, а также длинноволокнистые гранулированные материалы для литья под давлением и прессования [1, 2]. Ввиду значительных усилий, действующих на волокна при заполнении промежутков между ними высоковязкими полимерными расплавами, изменяется расположение волокон в пропитываемом слое [3]. Структура композита, формирующаяся в результате пропитки, оказывается неоднородной. В данной работе исследуются характеристики неоднородной микроструктуры термопластичных полимеров, однонаправленно армированных стеклоровингом, в зависимости от технологических факторов процесса пултрузионной пропитки.

Микроструктура однонаправленных композитов определяется расположением волокон в трансверсальном сечении. Анализировали микрошлифы лент шириной 6–12 мм, полученных пропиткой стеклоровинга расплавом полиамида-6, и фрагменты микроструктуры, сформированной в результате моделирования процесса перколяции нелинейно-вязкого полимерного расплава через стохастический волокнистый слой по методу, изложенному в статье [3]. В экспериментах применяли три типа стеклоровинга: РБТ10-2400, РБТ13-2400 и РБН18-5000. Согласно измерениям, средние значения диаметров волокон в этих ровингах – 9,8; 12,2 и 16,3 мкм соответственно, коэффициенты вариации диаметров волокон 11–14%. Такие же параметры распределения кругов на поле модельного фрагмента микроструктуры задавали и при моделировании. Изучали влияние вязкости, давления и способа подачи полимерного расплава и натяжения волокон в процессе пропитки на характеристики неоднородной микроструктуры композита.

Рассматривали две схемы пропитки, различающиеся по способу подачи полимерного расплава и исходному расположению волокон в трансверсальном сечении (рис. 1). Между волокнами в распушенном ровинге, вводимом в плоскощелевую головку (рис. 1, а), имеются стохастически распределенные зазоры. При моделировании пропитки по данному способу круги со случайными диаметрами размещали статистически

однородно на модельном фрагменте. Учитывая симметрию волокнистого слоя, пропитываемого по схеме на рис. 1, а, относительно срединной плоскости, в модели задавали только его половину.

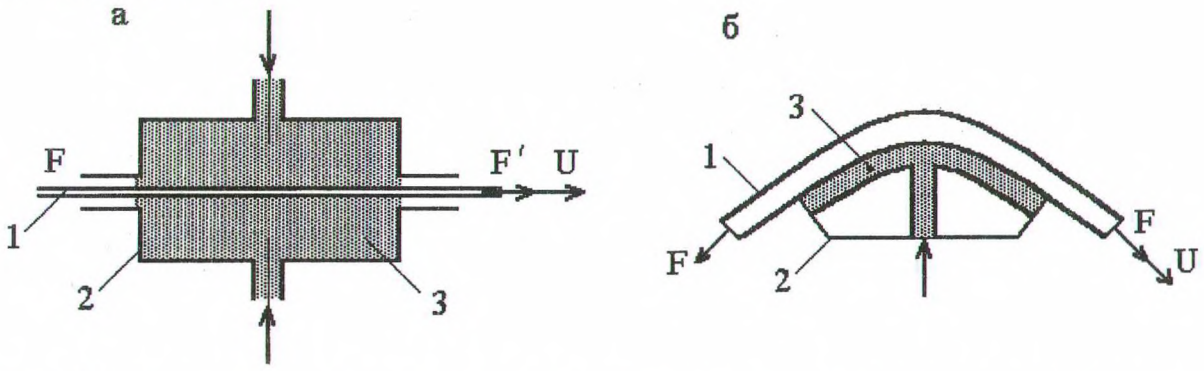

Рис. 1. Схемы пропитки волокнистого слоя: а – в плоскощелевой головке; б – на поверхности отклоняющего элемента. 1 – волокнистый слой; 2 – пропиточная головка; 3 – расплав

При пропитке по схеме на рис. 1, б натянутые волокна в исходном состоянии образуют плотный слой на поверхности отклоняющего элемента. Исходное положение волокон в модели при данном варианте пропитки получали, смещая стохастически расположенные круги в направлении отклоняющей поверхности до соприкосновения с уже имеющимися.

Для описания микроструктуры композитов, получаемых в результате пропитки стеклоровинга, использовали осредненные (интегральные) характеристики, а также законы и параметры распределения величин, задающих расположение волокон в трансверсальном сечении.

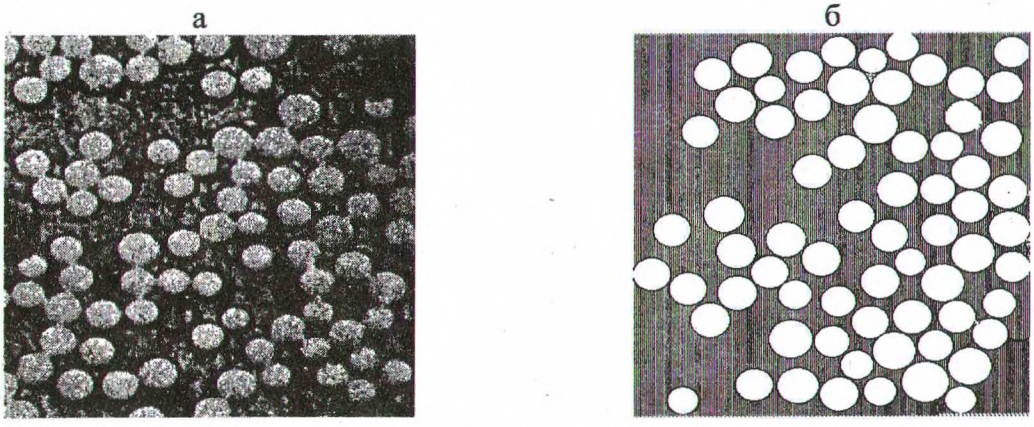

Рис. 2. Микрошлиф (300×) однонаправленного композита (а) и модель (б)

Пусть A_o – площадь типичного фрагмента структуры (для модельных структур принимали $A_o = 1$), N – число волокон, расположенных на типичном фрагменте. Площадь, занимаемая волокнами, $A_o = \pi\Sigma R_i^2$. Относительная доля площади, занимаемой волокнами (средняя степень заполнения), $P = A_в/A_o$. Доля площади, занимаемая связующим, $P_c = A_c/A_o$. В общем случае $P + P_c \neq 1$, поскольку часть площади трансверсального сечения не заполнена полимером. Эта часть (пористость) равна $P_п = A_п/A_o$, где $A_п$ – межволоконная площадь, не заполненная полимером. Очевидно, что $P + P_в + P_п = 1$.

Часть площади A_c' вообще не содержит волокон, ее доля $P_c' = A_c'/A_0$. Степень заполнения волокнами оставшейся части площади сечения фрагмента $P' = P/(1 - P_c')$. Доля волокон, смоченных расплавом, на этой части площади составляет P^*, а не смоченных расплавом – P'', причем $P' + P'' = P$. Величина P' характеризует действительную степень пропитки, а ее зависимость от координат – однородность структуры.

Микроструктуру композита характеризовали также распределением числа волокон, пересекаемых прямой, проведенной через трансверсальное сечение в заданном направлении, и распределениями хорд и промежутков между волокнами на этой прямой. Средняя длина хорд, пересекающих случайным образом волокна диаметром d, равна $a = \pi d/4$. Число кругов, пересекаемых прямой, при статически однородном расположении их в слое толщиной h распределено по закону Пуассона с параметром N (средним значением, равным дисперсии), который выражается через среднюю долю площади, занимаемой волокнами, P соотношением:

$$N = (4Ph)/(\pi d). \qquad (1)$$

Это соотношение использовали для оценки теоретических параметров распределения числа волокон в сечении ленты. По средним значениям длин хорд a и промежутков между волокнами b вычисляли доли площади, занимаемой компонентами $P = a/(a + b)$. Отклонение экспериментальных значений параметров от вычисленных по приведенным выше формулам характеризует степень неоднородности микроструктуры композита.

Однородность микроструктуры в однонаправленной ленте, полученной путем пропитки стеклоровинга РБТ13-2400 и двойного РБТ10-2400 в плоскощелевой головке, оценивали по распределению числа волокон, пересекаемых параллельными прямыми, проведенными на фотоотпечатках микрошлифов лент (с увеличением 1000×) в направлении толщины ленты. Сравнение теоретического и экспериментального распределений (рис. 3) показало, что средние значения числа волокон, пересекаемых прямыми, найденные экспериментально (12,1 для ленты на основе стеклоровинга РБТ13-2400 и 21,2 для ленты на основе РБТ10-2400х2), близки к теоретическим (12,2 и 21,4 соответственно), рассчитанным по формуле (1). Коэффициенты вариации для экспериментальных значений 0,39 и 0,30 при теоретических 0,29 и 0,23 соответственно, при этом дисперсии экспериментальных значений вдвое больше теоретических, что свидетельствует о значительной неоднородности распределения волокон в ленте.

На микрошлифах прослеживается наличие уплотненных областей в срединной части ленты. Наблюдается также неоднородное распределение волокон по ширине ленты, на что указывает смещение экспериментальных точек на рис. 3 в область больших чисел пересечений. Эти особенности структуры, а также влияние на микроструктуру композита схемы и параметров процесса пропитки оценивали по результатам моделирования перколяции расплава через слой волокон.

Структура, полученная в результате моделирования пропитки в плоскощелевой головке (рис. 1, а), оказалась более неоднородной, чем структура, полученная для схемы пропитки на рис. 1, б, хотя для исходных структур справедливо обратное (рис. 4). Установленная закономерность вполне объясняется различными условиями смещения волокон под воздействием полимерного расплава. При пропитке ровинга в плоскощелевой головке расплав сжимает волокнистый слой с двух сторон, что ограничивает возможность смещения волокон, расположенных в средней части слоя. Данное ограни-

чение отсутствует при пропитке на отклоняющей поверхности: смещение волокон в этом случае связано только силовыми факторами.

В сечении модели, воспроизводящей пропитку ровинга в плоскощелевой головке, степень заполнения волокнами со стороны подачи расплава невелика – 0,1-0,2, а в срединном слое она достигает 0,7–0,8, т.е. близка к предельной для плотно упакованной стохастической системы волокон.

Изменение доли волокон в направлении потока расплава (кривая 3 на рис. 4) удовлетворительно описывается экспоненциальной функцией:

$$P(x) = P'\left(1-\exp\left[-\left(\frac{x-c}{P}\right)^{q}\right]\right), \qquad (2)$$

где P' – доля волокон в предельно уплотненной стохастической структуре; P – средняя степень заполнения волокнами; c и q – параметры, зависящие от условий пропитки.

С увеличением натяжения волокон распределение доли волокон по сечению становится более однородным (рис. 4). Это следует и из анализа параметров распределения расстояний между волокнами. Распределение расстояний между волокнами как в исходной, так и в конечной структуре соответствует закону Вейбулла. Для исходной системы волокон коэффициент вариации и показатель степени в законе распределения Вейбулла близки к единице, что соответствует экспоненциальному распределению расстояний между волокнами, вытекающему из однородного (пуассоновского) размещения кругов на модельном поле.Среднее значение расстояния между волокнами в композите незначительно изменяется с увеличением натяжения волокон. Коэффициент вариации этой величины составляет при пропитке без натяжения волокон 1,4 – в направлении толщины и 1,8 – в направлении ширины слоя; при натяжении волокон усилием *0,2* F_p (F_p – разрушающее усилие) он составляет 1,3 и 1,9, а при натяжении F_p – 1,1 и 1,5 соответственно.

Рис. 3. Теоретические (линии) и экспериментальные (точки) распределения числа волокон по толщине в лентах на основе стеклоровинга РБТ13-2400 (1) и РБТ10-2400х2 (2)

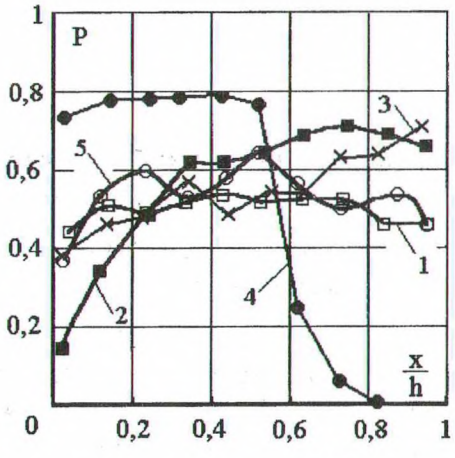

Рис. 4. Степень заполнения модельного поля волокнами по глубине слоя x (h – толщина слоя) при пропитке в плоскощелевой головке (1–3) и на отклоняющем элементе (4,5): 1,4–исходное положение; 2, 5 – при натяжении волокон 0,1 F_p,3 – при натяжении волокон 0,9 F_p

Из приведенных данных следует, во-первых, что неоднородность композита по ширине ленты даже несколько больше, чем неоднородность по толщине, задаваемая функцией (2). Во-вторых, натяжение волокон способствует формированию более однородной структуры композита.

Увеличение вязкости от 400 до 1600 $Па \cdot с^{0,75}$ и давления расплава от 0,15 до 3,0 МПа приводит к увеличению средних значений промежутков между волокнами от 6 до 9 мкм , но при этом возрастают и коэффициенты вариации размеров промежутков с 50 до 70%, что указывает на то, что структура становится более неоднородной. Относительное изменение параметров, характеризующих структуру композита, при изменении вязкости и давления расплава невелико.

Таким образом, анализ структуры волокнистого композита, получаемой в результате пропитки, свидетельствует о существенно неоднородном расположении волокон в материале, зависящем от способа и параметров процесса пропитки. Предложенные методы адекватно описывают наблюдаемые особенности волокнистой структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ставров В.П., Ставров В.В., Кременевская Е.И., Панкова Н.В. Пропитка натянутой влокнистой системы термопластичным расплавом // Материалы, технологии, инструменты. – 1999. № 1. – С. 9–14.

2. Наркевич А.Л., Марков А.В., Ставров В.П. Длинноволокнистые стеклонаполненные термопласты для литья под давлением и прессования // Полимерные композиты.– 2000: Сб. трудов конф., Гомель: ИММС. – 2000. – С. 117–121.

3. Ставров В.П., Ставров В.В., Панкова Н.В., Фридрих К. Изменение структуры и проницаемости натянутого волокнистого слоя в процессе пропитки расплавом термопластичного полимера // Механика композитных материалов. – 2000. № 2. – С. 259–270.

502.5(203):519.876.5

И.Г. Сухорукова, ассистент

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ ГОРОДА

The Methods of mathematical modelling of an atmosphere of city based on the equations of aerodynamics and function of the response are described.

В связи с увеличением концентрации загрязняющих примесей, выделяемых промышленными предприятиями и транспортом, возникает проблема управления качеством атмосферы города, которая тесным образом связана с проблемой планирования режимов работы действующих предприятий и транспорта, размещения новых промышленных объектов, транспортных магистралей и жилых массивов с учетом допустимых нагрузок на окружающую среду и социально-экономических критериев.

Характерная высота атмосферного слоя, в пределах которого происходит наиболее интенсивный перенос загрязнений, составляет диапазон 250 м – 2 км. Этот слой называют пограничным. Атмосфера в его пределах представляет собой подвижную среду, в которой происходят разнообразные по масштабам, направлению и скорости движения. Обычно эти движения носят турбулентный характер и характеризуются непостоянством поля скоростей. При таких движениях образуются беспорядочные, меняющие-