

УДК 539.32 : 678.067

М. И. КУЛАК

**СТРУКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ  
ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫХ ПЛАСТИКОВ***(Представлено академиком АН Беларуси В. С. Комаровым)*

Большинство представляющих интерес для технических приложений композиционных материалов имеют, как правило, сложную структуру, которая подразделяется на несколько уровней организации. Проблемы исследования взаимосвязей и взаимодействий всей иерархии структурных уровней, а также прогнозирования появляющихся в этих условиях синергических эффектов можно решать только при условии наличия достаточно разработанной теории структур материалов [1]. Однако в этой области имеется существенное отставание теоретических методов от экспериментальных, особенно для таких материалов, как дисперсно-армированные пластики, содержащие разные по характеру наполнители. Отметим, что в настоящее время практически отсутствуют и методы прогнозирования упруго-прочностных свойств таких материалов, позволяющие предсказать и рассчитать оптимальные соотношения армирующих компонентов [2].

Модель структуры дисперсно-армированного пластика строится путем обобщения на случай наличия в композиционном материале трех компонентов рассмотренного в работе [3] диаграммного подхода. При этом сохраняется основная идея подхода, состоящая в том, что каждый из компонентов может находиться в материале в определенных структурных состояниях в виде отдельных частиц — основных элементарных структурных единиц; распределения агрегатов из отдельных частиц; перколяционного либо в виде структуры более общего типа — фрактального кластера, имеющего размер порядка размера системы. Можно считать структурную организацию компонента в виде перколяционного кластера в силу ее сложности высшим типом. Компонент может находиться в материале в каком-то одном структурном состоянии или сразу в нескольких. При этом наличие более высокого структурного состояния предполагает наличие более низких, из которых данное состояние собственно и строится.

Объемная доля компонента, необходимая для возникновения перколяционного кластера, составляет для задачи узлов, т. е. когда наполнители имеют форму сфер, кубов или близкую к ним, — 0,31, для задачи связей, имеющей место для волокнистых, пластинчатых, ленточных дисперсных наполнителей, — 0,25. Таким образом, теоретически возможны композиционные материалы, в которых все компоненты находятся в виде взаимопроникающих перколяционных или фрактальных кластеров. Как было показано в [3], область структурного фазового перехода характеризуется неоднозначностью свойств материала, а следовательно, и их нестабильностью и трудностью по чисто технологическим причинам одинакового воспроизводства. Поэтому в реальных трехкомпонентных

композиционных материалах (это подтверждают результаты анализа их состава), как правило, один из армирующих компонентов имеет содержание ниже критического.

В качестве примера рассмотрим композиционный материал, содержащий пластинчатый и волокнистый дисперсные наполнители. Структурная диаграмма указанного материала приведена на рис. 1. Предполагается, что объемная доля полимера составляет 0,25. Характеристики его будем обозначать индексом  $m$ . Соотношения структурных состояний

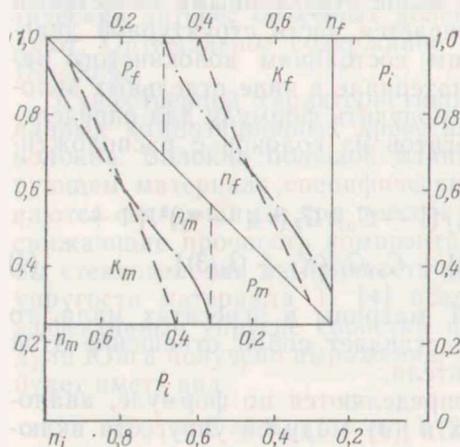


Рис. 1

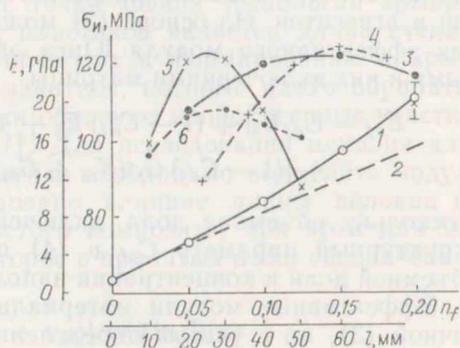


Рис. 2

пластинчатого ( $i$ ) и волокнистого ( $f$ ) наполнителей представлены в левой верхней части диаграммы. Для их вычисления использовались приведенные в [3] соотношения. Объемную долю матрицы в докритической области ее состояний можно менять, при этом соответственно будет параллельно сдвигаться часть диаграммы, относящаяся к наполнителям.

Из рис. 1 видно, что пластинчатый наполнитель находится в материале преимущественно в виде перколяционного кластера, а также и в более низких структурных состояниях. Волокнистый наполнитель может находиться как в докритическом состоянии, так и при объемной доле свыше 0,25 в виде перколяционного кластера, т. е. в системе произойдет структурный переход и волокна будут образовывать самостоятельную непрерывную фазу. Но вместе с тем они присутствуют в материале также в виде отдельных волокон и небольших агрегатов.

Далее на основе приведенной структурной диаграммы разрабатывается процедура расчета упругих и прочностных свойств полиармированных композиционных материалов.

Процедура определения эффективных модулей упругости композиционных материалов с пластинчатыми наполнителями аналогична приведенной в [3]. Отличаются только выражения для модулей упругости. В случае среды с пластинчатыми наполнителями формулы для объемных  $K$  и сдвиговых  $G$  модулей упругости [4]

$$K = K_m + \{(K_i - K_m)C/[1 + (K_i - K_m)/(K_m + 4/3G_i)]\}, \quad (1)$$

$$G = G_m + \{(G_i - G_m)C/[1 + (G_i - G_m)/(G_m + G_d)]\}, \quad (2)$$

где

$$G_d = G_i(9K_i + 8G_i)/6(K_i + 2G_i).$$

Используя (1) и (2), методом поэтапной квазигомогенизации [3] определяются эффективные модули упругости.

Далее рассматриваются состояния материала, в которых среда, представленная матрицей с пластинчатым наполнителем, играет роль матрицы с уже известными эффективными свойствами, и в нее дополнительно

вводится дисперсный волокнистый наполнитель. Параметры, характеризующие свойства такой матрицы, будем обозначать индексом  $M$ . В [4] получено следующее выражение для модуля Юнга системы, содержащей произвольно ориентированные короткие волокна:

$$E = n_f E_f + (1 - n_f) E_M + 4n_f (1 - n_f) G_M (v_f - v_M)^2 / \{1 + [(1 - n_f) G_M / (K_f + G_f/3)] + n_f G_M / (K_M + G_M/3)\}. \quad (3)$$

В соответствии с обсуждавшимися выше структурными свойствами композиционного материала рассматривается часть структурной диаграммы, соответствующая докритическим состояниям волокнистого наполнителя. При этом он находится в материале в виде отдельных волокон и агрегатов. На основе (3) можно получить формулу для определения эффективного модуля Юнга агрегатов из волокон с расположенными в них включениями матрицы

$$E_{af} = C_{af} E_M + (1 - C_{af}) E_f + 4C_{af} (1 - C_{af}) G_f (v_M - v_f)^2 / \{1 + [(1 - C_{af}) G_f / (K_M + G_M/3)] + C_{af} G_f / (K_f + G_f/3)\}. \quad (4)$$

Поскольку объемная доля включений матрицы в агрегатах мала, то структурный параметр  $C_{af}$  в (4) представляет собой отношение этой объемной доли к концентрации наполнителя.

Эффективные модули материала определяются по формуле, аналогичной (3), но с учетом определенных в (4) модулей упругости включений

$$E = C_{am} E_{af} + (1 - C_{am}) E_M + 4C_{am} (1 - C_{am}) G_M (v_f - v_M)^2 / \{1 + [(1 - C_{am}) G_M / (K_f + G_f/3)] + C_{am} G_M / (K_M + G_M/3)\}. \quad (5)$$

Структурный параметр определяется по формуле [3]

$$C_{am} = 1/n_{km} \sum_s s^3 \rho N_s. \quad (6)$$

Результаты расчета зависимости модулей упругости от объемной доли волокнистого наполнителя для армированного стекловолокном композиционного древесного пластика приведены на рис. 2 (кривая 1). Там же приведено экспериментальное значение модуля по данным [5]. Характеристики стекловолокна для расчетов взяты из [6]. На рис. 2 видно, что как экспериментальное значение модуля, так и теоретическое проходят выше штриховой линии (прямая 2), представляющей модули, полученные по правилу смесей. Таким образом, для данного конкретного типа наполнителей действительно наблюдается синергический эффект и развитая теория позволяет его описать.

Развитый метод описания деформационных свойств дисперсных структур и материалов позволяет построить описание прочностных свойств армированных композиционных пластиков. Прочность подсистемы матрица — пластинчатый наполнитель

$$\sigma_M = \sigma_i k \omega (n_i + n_m E_m / E_i), \quad (7)$$

где  $\sigma_i$  — прочность наполнителя;  $n_i$  — объемная доля наполнителя в композите;  $n_m$  — объемная доля матрицы;  $k$  — степень покрытия матрицей поверхности контакта частиц наполнителя;  $\omega$  — степень контактности, равная отношению площади контактов к общей площади поверхности частиц наполнителя. Коэффициенты  $k$  и  $\omega$  в (7) позволяют учесть дискретный характер наполнителя и матрицы, при малых значениях ее объемной доли, в композите.

Далее с помощью пошаговой процедуры, аналогичной предложенной в [1], определяется эффективная прочность пластика. При этом роль матрицы выполняет подсистема древесина — полимер и в нее вносятся

дисперсный волокнистый наполнитель. Выражение для прочности на некотором произвольном шаге процедуры  $j$  имеет вид

$$\sigma_j = \sigma_{j-1} [(1 - \Delta n_j) + \Delta n_j E_f / E_{Mj}],$$
$$\Delta n_j = (n_{fj} - n_{fj-1}) / (1 - n_{fj-1}). \quad (8)$$

Результаты вычисления зависимости прочности на изгиб пластика от объемной доли волокнистого наполнителя приведены на рис. 2 (кривая 3). Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными [7] (кривая 4) показывает, что в области представляющих практический интерес объемных долей наполнителя (0,15—0,20) они совпадают. Оптимальное содержание волокнистого наполнителя составляет 15—20%.

Существенной характеристикой с точки зрения технологии армированных композиционных древесных пластиков является длина стекловолокна. Волокна большой длины приводят к формированию в армирующем материале специфических завитков, которые плохо обрабатываются связующим и при прессовании образуют непроклеенные участки, снижающие прочность композита [7]. Для исследования влияния длины стекловолокна на прочность пластика необходимо вычислить модуль упругости материала. В [4] исследовано влияние длины волокна на эффективные упругие свойства простого композита, при этом для модуля Юнга получено выражение, которое в принятых нами обозначениях будет иметь вид:

$$E = E_M (1 + n_f \{1/[2(1 + \nu_M)]/\varphi^2 \{\ln(2/\varphi) - (5 - 4\nu_M)/[4(1 - \nu_M)]\}\}), \quad (9)$$

где  $\varphi$  — отношение диаметра волокна к его длине.

Результаты вычислений зависимости прочности армированного пластика на изгиб от длины стекловолокна приведены на рис. 2 (кривая 5). Сопоставление с экспериментальными данными, полученными в [7] (кривая 6), показывает, что характер зависимостей одинаков. Максимальной прочностью обладают пластики, армированные волокном длиной 25—30 мм.

Таким образом, представленные результаты, отражающие влияние характеристик волокнистого наполнителя на свойства армированного пластика, показывают, что развитый подход отражает особенности бимодальной упаковки разнородных наполнителей и он может быть положен в основу систем проектирования таких материалов.

## Summary

A structural method of describing the elasticity modulus and strength of dispersion-hardened polymer composites has been developed on the basis of the fractal theory. The method is used for studying the influence of the content and dimension of particles on the strength properties of composit.

## Литература

1. Кулак М. И. // Докл. АН БССР. 1991. Т. 35, № 8. С. 704—707.
2. Композиционные материалы. Разрушение и усталость / Под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. М., 1978. Т. 5.
3. Кулак М. И. // Докл. АН БССР. 1990. Т. 34, № 9. С. 819—822.
4. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. М., 1982.
5. Белый В. А., Врублевская В. И., Купчинов Б. И. Древесно-полимерные конструкционные материалы и изделия. Минск, 1980.
6. Наполнители для полимерных композиционных материалов / Под ред. Г. С. Каца, Д. В. Милевски. М., 1981.
7. Белый В. А., Екименко Н. А., Анненков В. Ф. // Пластификация и модификация древесины. Рига, 1970. С. 219—223.