

Характеристики межфазных слоев полимерных композиционных материалов

Нелюб В.А.

МГТУ им. Н.Э. Баумана

mail@emtc.ru

В работе приведены расчетные схемы, на основании которых построены инженерные модели, позволяющие определять расчетным путем характеристики межфазных слоев и их упругие свойства. Проведена сравнительная оценка теоретических и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, волокнистые наполнители, межфазные слои, метод осреднения механических свойств, эффективные свойства.

Создание перспективных изделий современной техники требует разработки новых типов полимерных композиционных материалов (ПКМ), обладающих повышенной прочностью и высокой надежностью. Решение этой задачи возможно при создании теоретических методов оценки характеристик межфазного слоя (полимерная матрица – волокнистый наполнитель) [1].

Традиционно классические модели рассматривают ПКМ как параллельное соединение двух фаз при растяжении, что приводит к традиционному результату – формуле Фойхта, которая широко известна среди инженерных работников, как «правило смесей».

$$\sigma_k = \sigma_v V_v + \sigma_m (1 - V_v) \quad (1)$$

где σ_k – предел прочности ПКМ; σ_v и V_v – предел прочности и объемная доля волокнистого наполнителя соответственно; σ_m – напряжения, возникающие в полимерной матрице при деформировании волокон.

Модель (1) построена без учета адгезионного взаимодействия на границе раздела фаз и поэтому имеет место большое расхождение (в 1,5 и более раз) между экспериментальными и теоретическими значениями.

Целью настоящей работы было получение инженерных моделей, позволяющих определять значение толщин межфазных слоев ПКМ.

Рассмотрим монослой ПКМ, армированного волокнами, в рамках классической теории упругости. Разобьем монослой на ячейки периодичности (рис. 1.), исходя из предположения, что волокна распределены в объеме связующего равномерно.

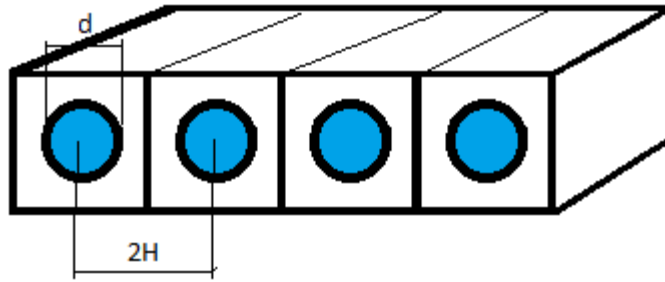


Рис.1. Схема разбиения монослоя на ячейки периодичности.

Введем следующие обозначения: d - диаметр волокна, $2H$ - расстояние между волокнами в монослое, l - длина волокна. Тогда параметры d и H определяют относительную объемную долю волокон $f = \pi d^2 / (16H^2)$, размеры ячейки периодичности $2H \times 2H \times l$, а также полутолщины фаз h_m, h_f эквивалентной слоистой ячейки периодичности в соответствии (рис.2).

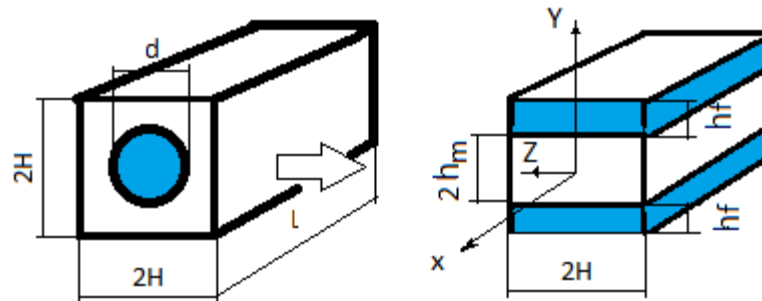


Рис.2. Схема перехода к слоистой ячейке периодичности.

Индексом m обозначены параметры, относящиеся к матрице (matrix), а индексом f - параметры, относящиеся к волокну (fiber). Введены следующие обозначения: $E_m, E_f, G_m, G_f, h_m, h_f$ - модуль Юнга, модуль сдвига и полутолщины фаз, причем: $h_m = (1 - f)H$, $h_f = fH$.

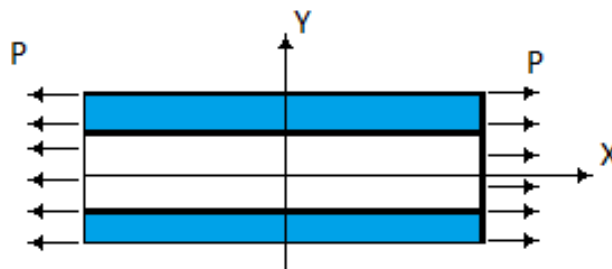


Рис.3 Схема нагружения ячейки периодичности

Использование ячейки периодичности (схема нагружения которой показана на рис. 3) позволяет проводить все последующие расчеты в декартовой системе координат и является наглядным, поскольку искомый межфазный слой подразделяется на две части, одна из которых лежит в поверхностном слое волокна и примыкает к границе контакта фаз, а вторая

часть – в поверхностном слое матрицы, также примыкающем к границе контакта.

Переход к слоистой ячейке периодичности представляется более удобным, чем традиционный, к примеру [1], переход к коаксиальной ячейке периодичности ($D = \frac{4}{\sqrt{\rho}} H$), показанный на рис.4,

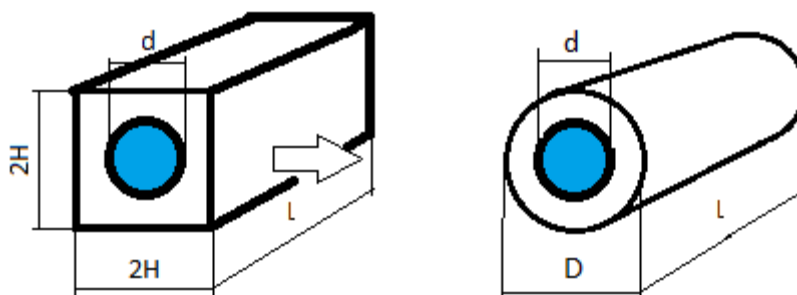


Рис.4. Схема перехода к коаксиальной ячейке периодичности.

так как это позволяет строить соответствующее решение в декартовой, а не цилиндрической системе координат.

Используем гипотезу о том, что в рассматриваемой модели поле перемещений R_i имеет только одну осевую компоненту R , которая является функцией двух координат x, y .

В результате проведенных расчетов установлена корреляция между свойствами ПКМ с учетом межфазных слоев

$$\frac{(h_m + h_f)}{E} = \frac{(h_m - h_{lm})}{E_m} + \frac{(h_f - h_{lf})}{E_f} + \frac{(h_{lm} + h_{lf})}{(E_m + E_f)/2} \quad (2)$$

где h_m, h_f – толщины слоя матрицы и волокна; h_{lm}, h_{lf} – толщины межфазного слоя, находящегося рядом с матрицей и волокном; E_m, E_f – модули матрицы и волокна.

Знаменатель последнего слагаемого трактуется как модуль межфазного слоя (третьей фазы) определяется через модули фаз:

$$E_l = (E_m + E_f)/2 \quad (3)$$

Толщины межфазного слоя для матрицы и волокна находим по уравнениям (4).

$$h_{lm} = \frac{1}{E_m} \frac{1}{\left[\frac{1}{E_m h_m \frac{th(a_m h_m)}{(a_m h_m)}} + \frac{1}{E_f h_f \frac{th(a_f h_f)}{(a_f h_f)}} \right]} \approx \frac{1}{E_m} \frac{1}{\left[\frac{1}{E_m h_m} + \frac{1}{E_f h_f} \right]} \quad (4)$$

$$h_{lf} = \frac{1}{E_f} \frac{1}{\left[\frac{1}{E_m h_m \frac{th(a_m h_m)}{(a_m h_m)}} + \frac{1}{E_f h_f \frac{th(a_f h_f)}{(a_f h_f)}} \right]} \approx \frac{1}{E_f} \frac{1}{\left[\frac{1}{E_m h_m} + \frac{1}{E_f h_f} \right]}$$

Полученные простые инженерные формулы, позволяют определять значение толщин межфазных слоев (4), а также характеризуют их структуру, особенностью которой является тот факт, что одна часть межфазного слоя лежит в поверхностном слое наполнителя, а вторая, в поверхностном слое матрицы и по своим размерам эти части существенно друг от друга отличаются.

В табл. приведены величины толщин межфазных слоев, рассчитанные теоретически, по уравнениям (4) и найденные экспериментально. Результаты экспериментальных исследований, были взяты из ранее выполненной работы [2].

Результаты теоретических и экспериментальных исследований толщин межфазных слоев

Марки волокон и связующих	Толщины межфазных слоев, мкм	Теоретически толщина межфазного слоя, мкм	Экспериментально определенная толщина межфазного слоя, мкм	Погрешность, %
Волокно ЛУП-0, Связующее ЭНТФ	0,01	1,37	1,41	2,8
	1,36			
Волокно Армос Связующее ЭДТ-69	0,04	3,05	3,68	20,6
	3,01			

Из полученных данных следует, что межфазный слой в ПКМ, в которых содержание волокна составляет 60 % и более, практически полностью находится в матрице (т.е. захватывает весь объем матрицы) и лишь совсем малая его часть находится в волокне.

Знание толщин межфазных слоев не является достаточным условием для того, что бы охарактеризовать величину адгезионного взаимодействия на межфазной границе матрица-волокно. Однако этот показатель в существенной степени характеризует структуру связующего на межфазной границе, которая, в свою очередь, оказывает большое влияние на механизм процессов разрушения и, как следствие этого, на долговечность изделий из ПКМ

Таким образом, в результате проведенных исследований в рамках классической механики сплошной среды разработана простая инженерная модель, позволяющая определения толщины межфазного слоя.

Отдельные результаты настоящей работы получены при финансовой поддержке по Государственному Контракту РФ №16.523.11.3012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г. Полимерные композиционные материалы: Прочность и технология – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2010. – 352 с.
2. Литвинов В.Б., Токсанбаев М.С., Деев И.С., Кобец Л.П., Рябовол Д. Ю., Нелюб В.А., «Кинетика отверждения эпоксидных связующих и микроструктура полимерных матриц в углепластиках на их основе», //Материаловедение, 2011, №7, стр.49-56.