

УДК 629.7.018.4:678.8

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-53-55

В.С. Ерасов<sup>1</sup>, А.И. Макарычева<sup>1</sup>**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ МЕЖФАЗНОЙ ЗОНЫ  
В СЛОИСТОМ ПОЛИМЕРНОМ КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ**

*Определены характеристики межфазной зоны в полимерном композиционном материале (ПКМ). Проведен анализ результатов экспериментальных исследований межфазных зон в слоистом углепластике. Проведен фрактографический и микроструктурный анализ разрушенных образцов. Предложена формула расчета модуля упругости межфазной зоны  $E_1$ , включающая модули упругости углепластика  $E$ , волокна  $E_F$ , полимерной матрицы  $E_M$  и доли волокна  $\omega_F$ , межфазной зоны  $\omega_M$ , матрицы  $\omega_1$  в поперечном сечении образца углепластика.*

**Ключевые слова:** связующее, армирующий наполнитель, полимерная матрица, полимерный композиционный материал, межфазная зона, модуль упругости межфазной зоны, модуль упругости углепластика, модуль упругости волокна, модуль упругости полимерной матрицы, доля волокна, доля межфазной зоны, доля полимерной матрицы, фрактографический анализ, микроструктурный анализ.

*Characteristics of the interphase zone in a polymer composite material (PCM) were defined. Results of experimental studies of interphase zones in layered PCM were analyzed. Fractographic and microstructural analysis of failed specimens was carried out. A formula for calculation of elastic modulus ( $E_1$ ) of the interphase zone, which includes elastic modules of PCM ( $E$ ), fibers ( $E_F$ ), polymeric matrix ( $E_M$ ) and fractions of fiber ( $\omega_F$ ), interphase zone ( $\omega_M$ ) and matrix ( $\omega_1$ ) in the cross section of PCM specimens was proposed.*

**Keywords:** binding agent, reinforcing filler, polymer matrix, polymer composite material, interphase zone, elastic modulus of the interphase zone, elastic modulus of PCM, elastic modulus of fiber, elastic modulus of polymer matrix, fiber fraction, fraction of interphase zone, fraction of polymer matrix, fractographic analysis, microstructural analysis.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации  
[Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

При создании нового ПКМ важным является получение информации о взаимодействии матрицы с поверхностью наполнителя, а также вопрос о влиянии этого взаимодействия на механические характеристики полимерного композиционного материала [1–6].

В процессе изготовления ПКМ необходимым является обеспечение условий соединения волокна с матрицей в единое целое таким образом, чтобы наиболее полно реализовать свойства наполнителя как армирующего элемента. Выполнение этого условия предполагает, что волокна в матрице должны быть ориентированы определенным образом, а химическое взаимодействие с матрицей не должно их ослаблять. Вместе с тем обеспечение прочной связи наполнителя с матрицей возможно при наличии достаточного взаимодействия между ними. Качественная и количественная оценка степени такого взаимодействия может быть получена при исследовании процессов, протекающих на межфазной границе «волокно–матрица».

Теория межфазных явлений в полимерных системах может рассматриваться как совокупность трех основных частей:

- адсорбции полимеров на твердых поверхностях армирующих волокон;
- адгезии полимеров к этим поверхностям;

– изменения структуры и свойств межфазного слоя на границе раздела «матрица–армирующее волокно» после адсорбции и адгезии [7].

Структура адсорбированного, граничного слоя матрицы отличается от структуры матрицы в объеме. Это связано с тем, что межфазное взаимодействие оказывает непосредственное влияние на прочность связи компонентов ПКМ, от которой существенно зависят такие характеристики композита, как продольная, поперечная и сдвиговая прочность, вязкость разрушения, модуль упругости, термостойкость и др. Исследования этого процесса и управление им являются важным звеном в формировании свойств композиционного материала.

Модуль упругости  $E$  – одна из основных физико-механических характеристик композита, поэтому возникает необходимость исследования этой характеристики с учетом наличия на поверхности наполнителя межфазного слоя (МФС). Толщина МФС позволяет оценить интенсивность взаимодействия поверхности наполнителя с матрицей.

На рис. 1 представлена схема нагружения растягивающей силой вдоль оси армирования образца углепластика с однонаправленной укладкой. Принимая гипотезу о том, что фазовая структура образца по всей его длине одинакова, из условия статического равновесия в сечении А получаем:

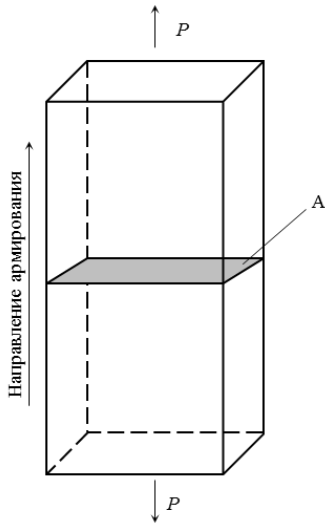


Рис. 1. Схема нагружения образца углепластика

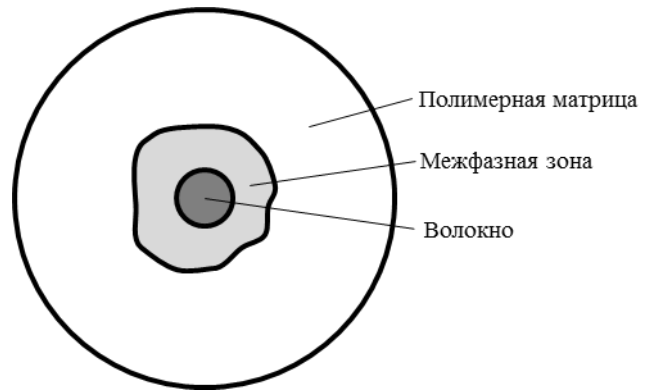


Рис. 2. Схема элемента поперечного сечения углепластика

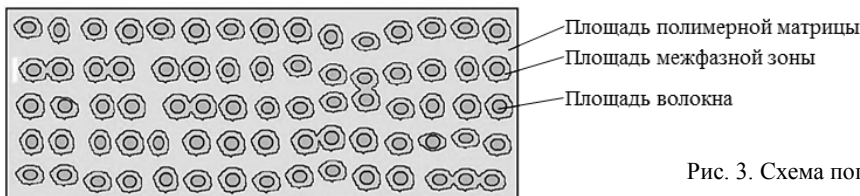


Рис. 3. Схема поперечного сечения углепластика

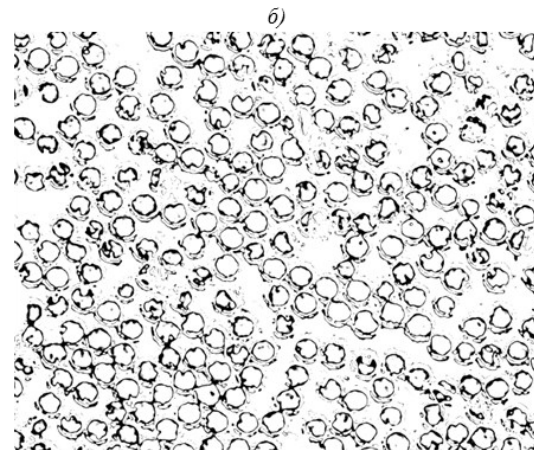
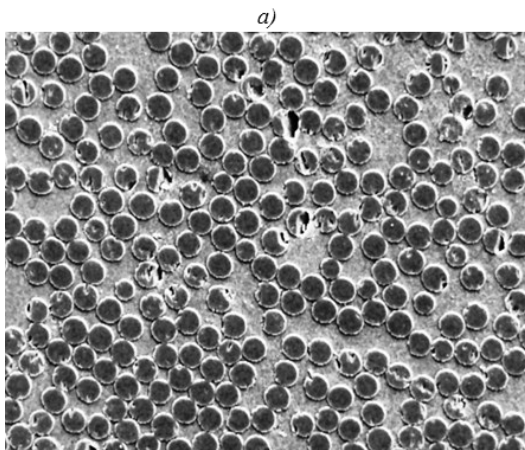


Рис. 4. Исходная (а) и обработанная (б) фотографии шлифа торцевой поверхности углепластика

$$P=R, \tag{1}$$

где  $R$  – реакция в сечении  $A$ .

Реакция  $R$  складывается из реакций волокна, межфазной зоны и полимерной матрицы. Анализ строения элемента поперечного сечения (рис. 2) дает возможность преобразовать формулу (1) к виду:

$$P=R=R_B+R_1+R_M, \tag{2}$$

где  $R_B$ ,  $R_1$ ,  $R_M$  – суммарная реакция соответственно волокон, межфазной зоны и полимерной матрицы в сечении  $A$ .

Предположим далее, что в рассматриваемом сечении материалы полимерной матрицы и наполнителя однородны, а для материала межфазной зоны на данном этапе характеристики рассматриваются как усредненные (рис. 3). Тогда поделив обе части уравнения (2) на площадь поперечного сечения

образца и выделив в этой площади части, занимаемые волокном и межфазной зоной, получим:

$$\frac{P}{S} = \frac{1}{S}(R_B+R_1+R_M); \tag{3}$$

$$\sigma = \sigma_B \frac{S_B}{S} + \sigma_1 \frac{S_1}{S} + \sigma_M \frac{S_M}{S}, \tag{4}$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения  $A$ ;  $\sigma_B$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_M$  – напряжение, действующее соответственно на волокно, межфазную зону и полимерную матрицу в сечении  $A$ ;  $S_B$ ,  $S_1$ ,  $S_M$  – суммарная площадь поперечного сечения соответственно волокна, межфазной зоны и поперечного сечения полимерной матрицы в сечении  $A$ .

На упругом участке деформирования уравнение (4) будет иметь вид:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E_B \cdot \varepsilon \cdot \frac{S_B}{S} + E_1 \cdot \varepsilon \cdot \frac{S_1}{S} + E_M \cdot \varepsilon \cdot \frac{S_M}{S} \tag{5}$$

или

$$E = \omega_B \cdot E_B + \omega_1 \cdot E_1 + \omega_M \cdot E_M, \quad (6)$$

где  $E$ ,  $E_B$ ,  $E_1$  и  $E_M$  – модуль упругости соответственно углепластика, волокна, межфазной зоны и полимерной матрицы;  $\omega_B$ ,  $\omega_1$  и  $\omega_M$  – доли соответственно волокна, межфазной зоны и матрицы в сечении А образца углепластика.

Формула (6) позволяет, зная модули упругости углепластика, полимерной матрицы, волокна и доли площадей полимерной матрицы, волокна и межфазной зоны от площади поперечного сечения А образца углепластика, определить модуль упругости межфазной зоны:

$$E_1 = \frac{E - \omega_B \cdot E_B - \omega_M \cdot E_M}{\omega_1}. \quad (7)$$

Объектом для исследования выбран углепластик ВКУ-25 с однонаправленной углеродной укладкой  $[0^\circ]$ , который состоит из эпоксидной матрицы ВСЭ-1212 и армирующего наполнителя из жгута HTS-40 E23 12K 800tex фирмы Tenax [8–13]. Проведены фрактографический и микроструктурный анализ разрушенных образцов полимерной матрицы и углепластика. По результатам испытаний образцов из матрицы было получено среднее значение модуля упругости при растяжении 3,51 ГПа. Определение объемного содержания наполнителя, полимерной матрицы и межфаз-

ной зоны проводилось по фотографиям шлифов торцевой поверхности углепластика [14, 15]. Для чего изображение обрабатывалось в графических программах ImageExpert и Photoshop (рис. 4). На обработанном рисунке черным цветом показаны межфазные зоны вокруг углеродных волокон. Далее подсчитывались доли площади, занимаемые на поверхности шлифов наполнителем, полимерной матрицей и межфазной зоной, которые составили для наполнителя 60%, полимерной матрицы 37% и межфазной зоны 3%.

Полученный результат показывает, что  $E_1 < E_M$ , – это закономерно, но не всегда. Несмотря на простоту формулы, она имеет недостатки. Величины числителя и знаменателя очень малы, что может привести к значительной погрешности. Для использования данной формулы подходит ПКМ, в котором количество матрицы больше, чем наполнителя. Для использования формулы (7) необходимо определение модулей упругости волокна, полимерной матрицы, углепластика, долей волокна, полимерной матрицы и межфазной зоны в поперечном сечении образца. Определение данных показателей требует большой трудоемкости и квалификации сотрудников. Это вызывает необходимость поиска новых, более простых методов для определения модуля упругости межфазной зоны в слоистом ПКМ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Композиционные материалы: Справочник /Под ред. В.В. Васильева. М.: Машиностроение. 1990. 512 с.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
3. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
4. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Шведкова А.К., Николаев Е.В. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 41–45.
5. Яковлев Н.О., Ерасов В.С., Сентюрин Е.Г., Харитонов Г.М. Релаксация остаточных напряжений в авиационных органических стеклах при послепоплетной стоянке самолета //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 66–69.
6. Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорокин К.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Методы исследования композиционных композиционных материалов с интегрированной электромеханической системой //Авиационные материалы и технологии. 2010. №4. С. 17–20.
7. Липатов Ю.С. Межфазные явления в полимерах. Киев: Наукова думка. 1980. 259 с.
8. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С., Севастьянов В.Г. Высокотемпературные конструкционные композиционные материалы на основе стекла и керамики для перспективных изделий авиационной техники //Стекло и керамика. 2012. №4. С. 7–11.
9. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С. Перспективные высокотемпературные керамические композиционные материалы //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 20–24.
10. Ерасов В.С., Гриневич А.В., Сеник В.Я., Коновалов В.В., Трунин Ю.П., Нестеренко Г.И. Расчетные значения характеристик прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 14–16.
11. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 440–448.
12. Устройство для испытания прочностных свойств конструкционных материалов: пат. 102801 Рос. Федерация; опубл. 15.10.2010.
13. Ерасов В.С., Нужный Г.А. Определение характеристик смятия при механических испытаниях //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №1. С. 14–21.
14. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Юрков Г.Ю. Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных композиционных материалов //Российские нанотехнологии. 2013. Т. 8. №3–4. С. 24–42.
15. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.