

УДК 678

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА МОДУЛЯ УПРУГОСТИ АДГЕЗИОННОЙ СВЯЗИ СИСТЕМЫ ЭПОКСИДНАЯ МАТРИЦА – УГЛЕРОДНОЕ ВОЛОКНО С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ

Нелюб В.А.*ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)», Москва, e-mail: admin@emtc.ru*

Настоящая статья посвящена решению вопросов адгезионного взаимодействия между полимерной матрицей с углеродным волокном, что связано с высокими значениями их удельной прочности, жесткости и уникальными теплофизическими свойствами. Наряду с совершенствованием теоретических методов моделирования адгезионных характеристик углепластиков, совершенствуются существующие и разрабатываются новые методы их экспериментальной оценки. Одним из наиболее распространенных методов является метод «pull-out», который относится к прямым методам измерения адгезионной прочности системы волокно – полимерная матрица. Приведены результаты экспериментальных исследований адгезионной прочности системы элементарная нить – полимерная матрица, определенные методом pull out. В результате проведенных исследований установлено, что путем нанесения на поверхность волокна металлического покрытия, возможно повысить величину адгезионной прочности. В работе исследованы два типа металлических покрытий (нержавеющая сталь и титан) и показано, что величина адгезионной прочности при нанесении на углеродную ленту покрытия из нержавеющей стали повышается на 28%, а при нанесении покрытий из титана, наоборот, снижается менее чем на 5%. Предложена методика определения модуля упругости адгезионной связи в системе волокно – полимерная матрица и показано, что наибольшие значения модуля адгезионного взаимодействия (6900 МПа) получены для системы элементарная углеродная нить с покрытием из нержавеющей стали – эпоксидная матрица.

Ключевые слова: модуль упругости адгезионной связи, моделирование, элементарная нить, полимерная матрица, углепластик, металлическое покрытие

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE ELASTICITY MODULE OF THE ADHESIVE CONNECTION OF THE SYSTEM EPOXY MATRIX – CARBON FIBER WITH METAL COATING

Nelyub V.A.*Federal State Budgetary Education Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical
University», Moscow, e-mail: admin@emtc.ru*

This article is devoted to solving the issues of adhesive interaction between the polymer matrix with carbon fiber, which is associated with high values of their specific strength, rigidity and unique thermal properties. Along with the improvement of theoretical methods for modeling the adhesive characteristics of carbon plastics, existing ones are being improved and new methods for their experimental evaluation are being developed. One of the most common methods is the «pull-out» method, which refers to direct methods for measuring the adhesion strength of a fiber-polymer matrix system. The results of experimental studies of the adhesion strength of an elementary filament – polymer matrix system, determined by the pull out method, are presented. As a result of the research it was found that by applying a metal coating on the surface of the fiber, it is possible to increase the amount of adhesive strength. The paper investigated two types of metal coatings (stainless steel and titanium) and showed that the adhesive strength value when applied to a carbon tape coating of stainless steel increases by 28%, and when applied to coatings of titanium, on the contrary, decreases by less than 5%. A method for determining the modulus of elasticity of the adhesive bond in the fiber-polymer matrix system is proposed, and it is shown that the highest values of the adhesive interaction modulus (6900 MPa) were obtained for the system by an elementary carbon filament with a stainless steel-epoxy matrix coating.

Keywords: modulus of elasticity of adhesive bond, modeling, filament, polymer matrix, carbon fiber, metal coating

Современные углепластики относятся к перспективным конструкционным материалам и области их применения постоянно расширяются [1, 2], что связано с высокими значениями их удельной прочности, жесткости и уникальными теплофизическими свойствами [3, 4].

Создание новых изделий современной техники требует совершенствования существующих теоретических и экспериментальных методов исследований [5]. Проблема

адгезионного взаимодействия между полимерной матрицей с углеродным волокном является одним из частных случаев механики твердого деформируемого тела [6–8]. Авторы работ [7, 8] предложили создать новое научное направление, которое получило название – адгезионная механика.

Простейшие модели разрушения углепластиков предполагают три механизма: когезионное разрушение волокна, когезионное разрушение матрицы и адгезионное

разрушение (расслоение) по границе их контакта [9–11]. Для расчетов углепластиков разработаны различные математические модели, позволяющие определять не только прочностные и упругие характеристики, но и геометрические толщины межфазных слоев [12].

Наряду с совершенствованием теоретических методов моделирования адгезионных характеристик углепластиков, совершенствуются существующие и разрабатываются новые методы их экспериментальной оценки. Одним из наиболее распространенных методов является метод «pull-out» [13], который относится к прямым методам измерения адгезионной прочности системы волокно – полимерная матрица.

Авторами работы [12] были предложены уравнения, позволяющие рассчитывать комплекс механических характеристик полимерных композиционных материалов, в том числе и толщины граничных слоев, в которые входит модуль адгезионной связи, однако они не предложили методов по его количественному определению.

Целью настоящей работы является разработка методики определения модуля упругости адгезионной связи.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследований использовали отечественную однонаправленную углеродную ленту ЛУП (ГОСТ 28006-88), на поверхность которой на отечественной установке магнетронного распыления МИР-2 [14, 15] наносили покрытия из титана марки ВТ1-0 (ГОСТ 19807-91) и нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т (ГОСТ 2590-71). Металлические покрытия наносили на углеродную ленту с двух сторон.

В качестве связующего использовали импортную композицию, состоящую из эпоксидной смолы и аминного отвердителя и близкую по свойствам к композиции из эпоксидной смолы ЭД-20 и диэтилентриамина [11].

Изготовление образцов для проведения испытаний методом pull-out проводили на установке Fimabond (производства фирмы Textechno). Для проведения исследований из углеродной ленты ЛУП выдергивали элементарные нити, каждую из которых устанавливали в специальное приспособление. Захват нити и ее ориентация в данном приспособлении осуществляются автоматически, поскольку оно работает по принципу пылесоса, что позволяет устанавливать элементарную нить в связующее с прецизионной точностью. Точность погружения элементарной нити в связующее контролировали тремя камерами, которыми оснащена установка Fimabond. Площадь адгезионного контакта регулируется количеством связующего. После погружения элементарной нити в связующее на глубину 2 мм, на этой же установке проходил процесс отверждения.

Испытание проводили на специальной разрывной машине Textechno марки Favimat+ после полного отверждения связующего (рис. 1).



Рис. 1. Фото машины для изготовления образцов при проведении испытаний методом pull-out

Используемое оборудование отличалось очень высокой точностью и позволяло фиксировать в специальных прецизионных приспособлениях элементарную нить диаметром от 1 до 10 мкм. Нагружение проводили при скорости движения захватов 0,1 мм/мин. Все испытания проводили при комнатной температуре. Средние значения адгезионной прочности, при испытании образцов с одним типом металлического покрытия, определялись по результатам пяти испытаний.

Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 1 приведены средние значения адгезионной прочности системы углеродная элементарная нить – эпоксидная матрица. Для каждого образца в автоматическом режиме проводили измерение диаметра элементарной нити в месте ее контакта с полимерной матрицей с точностью до 0,01 мкм, что позволяло с минимальными погрешностями определять значение адгезионной прочности.

Таблица 1

Адгезионная прочность системы элементарная нить – эпоксидная матрица

Характеристики образцов	Средние значения адгезионной прочности, МПа
Элементарная нить (без металлического покрытия)	87±8
Элементарная нить с покрытием из титана	83 ± 5
Элементарная нить с покрытием из нержавеющей стали	112 ± 5

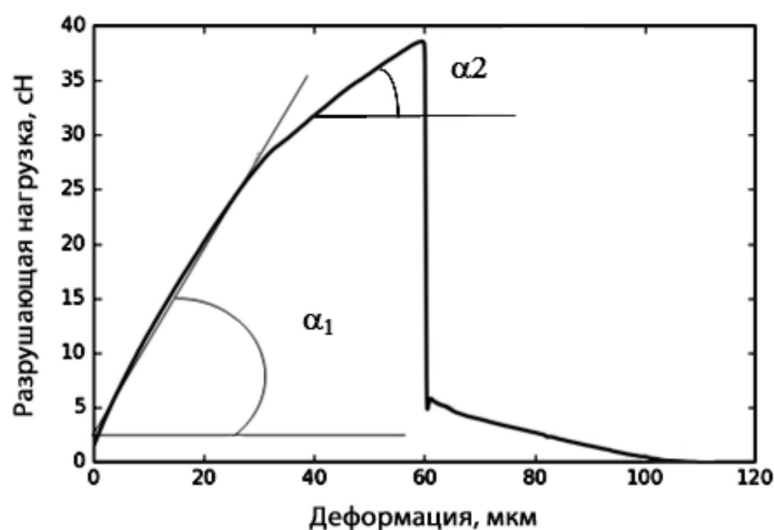


Рис. 2. Определение модуля адгезионной связи по результатам экспериментальных исследований методом pull-out

Таблица 2

Значения модуля адгезионной связи
для систем элементарная углеродная нить – полимерная матрица

Типы металлических покрытий и связующих	Модуль адгезионной связи, A_{mf} , МПа	
	$tg\alpha_1$	$tg\alpha_2$
Элементарная нить без металлического покрытия – эпоксидная матрица	5410	4720
Элементарная нить с покрытием из нержавеющей стали – эпоксидная матрица	6900	3400
Элементарная нить с покрытием из титана – эпоксидная матрица	5640	3310

В результате проведенных исследований установлено, что величина адгезионной прочности при нанесении на углеродную ленту покрытия из нержавеющей стали повышается на 28 %, а при использовании покрытий из титана, наоборот, уменьшается менее чем на 5 %.

В процессе проведения этих испытаний, для каждого образца получали диаграммы нагрузка – деформация (рис. 2), по которым находим значения модуля. В работе сделано предположение, что данные значения модуля являются характеристикой адгезионного взаимодействия и этот показатель был назван в работе модулем упругости адгезионной связи. Исследуемый образец представлял собой микроуглепластик на основе единичной элементарной нити и тонкого слоя полимерной матрицы, что позволяло его рассматривать как монослой с собственным модулем.

Для всех исследованных образцов, в том числе и для элементарной нити без металлического покрытия, зависимости

нагрузка – деформация не линейны. Выделяем на диаграмме два участка: линейный (участок 1) и нелинейный (участок 2) и на каждом из них находим тангенс угла α : на участке 1 ($tg\alpha_1$) и участке 2 ($tg\alpha_2$), которые равны значениям модулей. Модуль, найденный в результате проведения этих испытаний, фактически является модулем адгезионной связи A_{mf} , углеродной элементарной нити и эпоксидной матрицы (табл. 2).

Модуль, определенный по значениям $tg\alpha_2$ для всех рассмотренных пар нить – матрица ниже, чем аналогичный, найденный по величине $tg\alpha_1$. Модуль адгезионного взаимодействия для системы элементарная нить без покрытия с эпоксидной матрицей на 27 % ниже, чем для этой же системы для нити с покрытием из нержавеющей стали.

В рамках классической теории упругости была разработана модель углепластика, в которой учтены характеристики адгезионных взаимодействий между волокном и матрицей [12].

Уравнения (1) и (2) позволяют оценить величину максимальных нормальных напряжений в волокне (1) и матрице (2), которые действуют на межфазной границе с адгезионного взаимодействия на микроуровне, поскольку именно это взаимодействие учитывается через модуль упругости адгезионной связи A_{mf} .

$$\sigma_f^{\max} \approx p \frac{E_f(h_m + h_f)}{[E_m h_m + E_f h_f + A_{mf}]}, \quad (1)$$

$$\sigma_m^{\max} \approx p \frac{E_m(h_m + h_f)}{[E_m h_m + E_f h_f + A_{mf}]}, \quad (2)$$

где индексом m обозначены параметры, относящиеся к матрице; индексом f – параметры, относящиеся к волокну; E_m и E_f – модули упругости матрицы и волокна соответственно, МПа; h_m и h_f – толщины граничных слоев, находящиеся соответственно в матрице и волокне, мкм; p – величина разрушающей нагрузки, Н.

Уравнение (3) может быть использовано для определения деформации углепластика с учетом адгезионного взаимодействия на межфазной границе.

$$\varepsilon \approx \frac{p}{\left[E_m(1 - \varphi) + E_f \varphi + \frac{A_{mf}}{(h_m + h_f)} \right]}, \quad (3)$$

где φ – объемная доля волокна в углепластике, мас. ч.

Уравнения (1–3) позволяют определять основные механические свойства углепластика с учетом адгезионного взаимодействия на межфазной границе на микроуровне. Например, для углепластика с объемной долей волокна 0,6, с пределом прочности волокна при растяжении и модулем упругости 3000 МПа и 240 ГПа соответственно, с пределом прочности при растяжении и модулем упругости матрицы 80 МПа и 2800 МПа соответственно, значения предельной деформации такого углепластика составляют 0,012, тогда как если проводить аналогичный расчет с учетом модуля адгезионного взаимодействия на межфазной границе, то их величина составит 0,009.

Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что возможно управлять прочностью адгезионного взаимодействия в системе углеродное волокно – полимерная матрица путем нанесения на поверхность волокна металлического покрытия.

В работе исследованы два типа металлических покрытий (нержавеющая сталь и титан) и показано, что величина адгезионной прочности при нанесении на углеродную ленту покрытия из нержавеющей стали повышается на 28%.

Предложена методика определения модуля упругости адгезионной связи в системе волокно – полимерная матрица и показано, что наибольшие значения модуля адгезионного взаимодействия (6900 МПа) получены для системы элементарная углеродная нить с покрытием из нержавеющей стали – эпоксидная матрица.

Предложенная инженерная методика определения характеристик углепластика позволяет получать их значения с учетом адгезионных взаимодействий на межфазной границе. Найденные, с учетом модуля адгезионного взаимодействия, значения деформации углепластика ниже, чем если проводить расчеты без их учета. При использовании для производства углепластиков углеродных лент с металлическим покрытием из нержавеющей стали величина модуля адгезионного взаимодействия увеличивается, что приводит к повышению адгезионных свойств на межфазной границе и к снижению деформационных свойств углепластика.

Результаты настоящей работы получены в рамках проекта по теме «Научные исследования по разработке композиционных материалов со структурой управляемого хаоса и их применение в высокотехнологичном производстве» по заданию № 11.7291.2017/БЧ.

Список литературы

1. Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г. Полимерные композиционные материалы. Долгодурный: Издательский Дом «Интеллект», 2010. 352 с.
2. Баурова Н.И., Зорин В.А. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин: учеб. пособие. М.: МАДИ, 2016. 264 с.
3. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник Российского фонда фундаментальных исследований. 2017. № 3 (95). С. 97–105.
4. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Попков О.В., Соловьянчик Л.В. Перспективные технологии получения функциональных материалов конструкционного назначения на основе нанокompозитов с УНТ (Обзор) // Труды ВИАМ. 2016. № 3 (39). С. 7.
5. Цибизова Т.Ю., Гузева Т.А. Системы автоматического управления технологическими процессами отверждения изделий из полимерных композитов // Клеи. Герметики. Технологии. 2015. № 5. С. 35–40.
6. Полилов А.Н. Экспериментальная механика композитов: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 375 с.
7. Турусов Р.А. Адгезионная механика: монография. М.: Изд-во МГСУ, 2016. 230 с.
8. Турусов Р.А., Богачев Е.А., Елаков А.Б. Роль интенсивности адгезионного взаимодействия и жесткости матри-

цы в передаче усилий от цельного волокна к разорванному в волокнистом композите и в реализации прочности армирующих волокон // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2016. Т. 22. № 3. С. 430–451.

9. Баурова Н.И., Зорин В.А. Технологическая наследственность при производстве деталей машин из полимерных композиционных материалов: монография. М.: МАДИ, 2018. 220 с.

10. Михайлин Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. СПб.: Издательство «Научные основы и технологии», 2013. 720 с.

11. Петрова А.П., Малышева Г.В. Клеи, клеевые связующие и клеевые препреги / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2017. 472 с.

12. Нелюб В.А., Гуськов А.М., Белов П.А. К проектированию углепластиков на растяжение с учетом адгезии волокна к матрице // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2014. № 12–1. С. 62–66.

13. Горбаткина Ю.А. Адгезионная прочность в системах полимер – волокно. М.: Химия, 1987. 192 с.

14. Берлин Е.В., Сейдман Л.А. Получение тонких пленок реактивным магнетронным распылением. М.: Техносфера, 2014. 256 с.

15. Гарифуллин А.Р., Абдуллин И.Ш., Галямова К.Н., Скидченко Е.А. Влияние плазменной обработки на механические свойства пропитанных смолой углеродных волокон при растяжении // *Вестник Технологического университета*. 2015. Т. 18. № 13. С. 144–145.