

УДК 621.592.05

Дуденков А. А., Карпикова О. А., Гусарова И. А.

Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля».
Украина, г. Днепр

ОЦЕНКА АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ СИСТЕМЫ «ВОЛОКНО – СВЯЗУЮЩЕЕ»

В статье рассмотрено исследование равновесного краевого угла смачивания и проведена оценка адгезионной прочности системы «углеродное волокно – эпоксидное связующее».

Данная работа будет интересна инженерам-исследователям в области производства изделий из композиционных материалов: силовые элементы машин, самолетов, ракет и др. Исследования проведены по методике, разработанной в КБ «Южное».

Ключевые слова: углеродные волокна; настольный электронный сканирующий микроскоп; эпоксидное связующее; равновесный краевой угол смачивания; адгезионная прочность.

Введение

Создание высокопрочных полимерных композиционных материалов (ПКМ) конструкционного назначения является актуальной задачей современного материаловедения. Прочность ПКМ, армированных волокнами (волокнистых ПКМ), зависит от целого ряда физико-химических и технологических факторов, тесно связанных друг с другом. Ключевую роль в обеспечении прочности таких материалов играет прочность адгезионного соединения армирующего волокна с полимерной матрицей (или связующим) в элементарной ячейке волокнистого композита, которая определяет эффективность перераспределения напряжений между волокнами при нагрузке и механизм разрушения ПКМ.

Экспериментальное определение прочности адгезионного соединения для прогнозирования прочности ПКМ является весьма трудоемким процессом, поэтому другой актуальной проблемой при оптимизации состава связующих для ПКМ является разработка методик экспрессного контроля адгезии связующего к волокнам различного типа [1].

Цель работы: исследование равновесного краевого угла смачивания и оценка адгезионной прочности системы «углеродное волокно – эпоксидное связующее».

Задачи работы:

- определение равновесных краевых углов отвержденного эпоксидного связующего к единичным углеродным волокнам с помощью электронной микроскопии;
- проведение оценки адгезионной прочности;
- проведение статистической обработки результатов исследования.

Объект исследования:

- углеродные волокна марки УКН/5000;
- эпоксидное связующее марки ЭДТ-69У.

Методика включает следующие этапы:

- изготовление образцов;
- исследование образцов;
- обработка результатов.

Изготовление образцов

Образец представляет собой единичное углеродное волокно с нанесенными отвержденными каплями эпоксидного связующего определенного диаметра.

Эскиз предметного столика с образцом представлен на рисунке 1.

Капли связующего наносили металлической проволокой с диаметром $0,1 \pm 0,2$ мм, предварительно смоченной связующим. На каждое единичное углеродное волокно, закрепленное на предметном

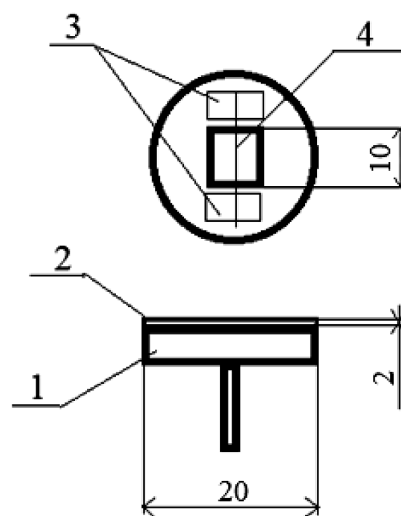


Рис. 1. Эскиз предметного столика с закрепленным образцом единичного углеродного волокна: 1 – предметный столик; 2 – единичное углеродное волокно с нанесенными каплями связующего (образец); 3 – клей

столике, наносили примерно 20 капель связующего. Общее количество единичных волокон составило 10 шт.

Следующий шаг – отверждение связующего. С этой целью единичные углеродные волокна с нанесенным связующим были помещены в нагретую до 120°C муфельную печь на 30 мин.

Исследование образцов

Изготовленные образцы помещались в электронный микроскоп, с целью получения микрофотографий капли на волокне.

Из полученных микрофотографий выбирались такие, которые отвечают следующим условиям:

- капля должна быть симметричной формы;
- отношение диаметра капли к диаметру волокна в диапазонах: $1,80 \div 1,85$; $1,85 \div 1,90$; $1,90 \div 1,95$; $1,95 \div 2,00$; $2,00 \div 2,05$.

По выбранным микрофотографиям проводился замер следующих величин:

- диаметр волокна, d ;
- диаметр капли, D ;
- длина волокна, смачиваемой каплей, L .

На рисунке 2 представлена типичная микрофотография капли связующего на углеродном волокне с замерами. Результаты самих замеров представлены в таблице 1.

Обработка результатов

1. Равновесный краевой угол смачивания рассчитывался по следующей формуле [2]:

$$\theta = 2 \arctan \left(\frac{D - d}{L} \right), \text{ град} \quad (1)$$

Результаты замеров

<i>n</i>	<i>D/d</i>	<i>D</i> , мкм	<i>d</i> , мкм	<i>L</i> , мкм
1	1,84	15,1	8,2	35,9
2	1,83	15,5	8,5	34,1
3	1,84	14,8	8,0	34,8
4	1,80	13,7	7,6	31,0
5	1,80	15,2	8,4	33,2
среднее	1,83	14,9	8,2	33,8
1	1,85	15,4	8,3	35,2
2	1,89	15,1	8,0	32,4
3	1,86	14,7	7,9	34,6
4	1,88	15,4	8,2	34,4
5	1,86	15,1	8,1	34,0
среднее	1,87	15,1	8,1	34,1
1	1,90	15,6	8,2	35,8
2	1,94	15,5	8,0	34,2
3	1,91	15,9	8,3	34,6
4	1,93	15,2	7,9	35,5
5	1,92	15,4	8,0	35,0
среднее	1,92	15,5	8,1	35,0
1	1,95	16,4	8,4	35,0
2	1,97	16,0	8,1	36,8
3	1,95	15,2	7,8	34,5
4	1,99	15,9	8,0	34,8
5	1,98	15,6	7,9	36,2
среднее	1,97	15,8	8,0	35,5
1	2,03	16,2	8,0	34,8
2	2,01	15,7	7,8	34,2
3	2,00	15,4	7,7	36,0
4	2,04	16,7	8,2	37,1
5	2,02	16,8	8,3	35,9
среднее	2,02	16,2	8,0	35,6

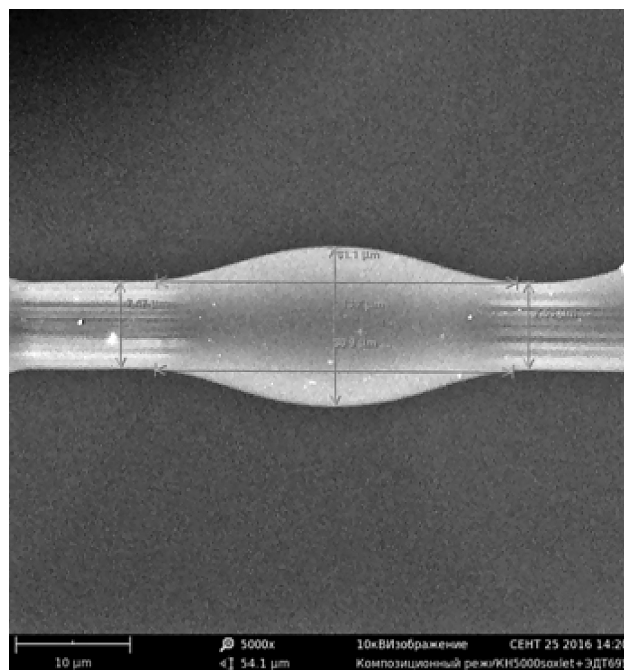


Рис. 2. Микрофотография капли связующего на углеродном волокне с замераи

2. Оценка адгезионной прочности проводилась по уравнению Дюпре–Юнга [3]:

$$\frac{W_a}{W_k} = \frac{(1 + \cos\theta)}{2}, \quad (2)$$

где W_a – работа адгезии;
 W_k – работа когезии.

Из этого уравнения следует, что при $\frac{W_a}{W_k} = 1$, адгезионная прочность – максимальна, и при $\frac{W_a}{W_k} \rightarrow 0$ адгезионная прочность – минимальна.

3. Статистическая обработка данных проводилась согласно [4].

Таблица 2

Результаты исследования угла смачивания и оценки адгезионной прочности системы «углеродное волокно марки УКН/5000 – связующее марки ЭДТ-69У»

	D/d									
	1,80–1,85		1,85–1,90		1,90–1,95		1,95–2,00		2,00–2,05	
n	θ, град.	W_a/W_k	θ, град.	W_a/W_k	θ, град.	W_a/W_k	θ, град.	W_a/W_k	θ, град.	W_a/W_k
1	22	0,964	23	0,961	23	0,959	26	0,951	27	0,947
2	23	0,959	25	0,954	25	0,954	24	0,956	26	0,950
3	22	0,964	22	0,963	25	0,955	24	0,956	24	0,956
4	22	0,963	24	0,958	23	0,959	26	0,951	26	0,950
5	23	0,960	23	0,960	24	0,958	24	0,956	27	0,947
среднее	22	0,962	23	0,959	24	0,957	25	0,954	26	0,950
стандартное отклонение	0,7	0,002	1,0	0,003	0,7	0,002	0,8	0,003	1,0	0,004
коэффициент вариации, %	3,0	0,23	4,3	0,36	2,9	0,26	3,3	0,32	3,9	0,39

Результаты исследования угла смачивания и оценки адгезионной прочности системы «углеродное волокно марки УКН/5000 – связующее марки ЭДТ-69У» представлены в таблице 2.

На рисунках 3 и 4 по результатам расчетов представлены диаграммы зависимости отношения работы адгезии к работе когезии от отношения диаметра капли к диаметру волокна и угла смачивания.

Выводы

В результате проведения исследования равновесного краевого угла смачивания и оценки адгезионной прочности системы «углеродное волокно – эпоксидное связующее» при отношении диаметра капли к диаметру волокна равным: $1,80 \pm 2,05$ было определено:

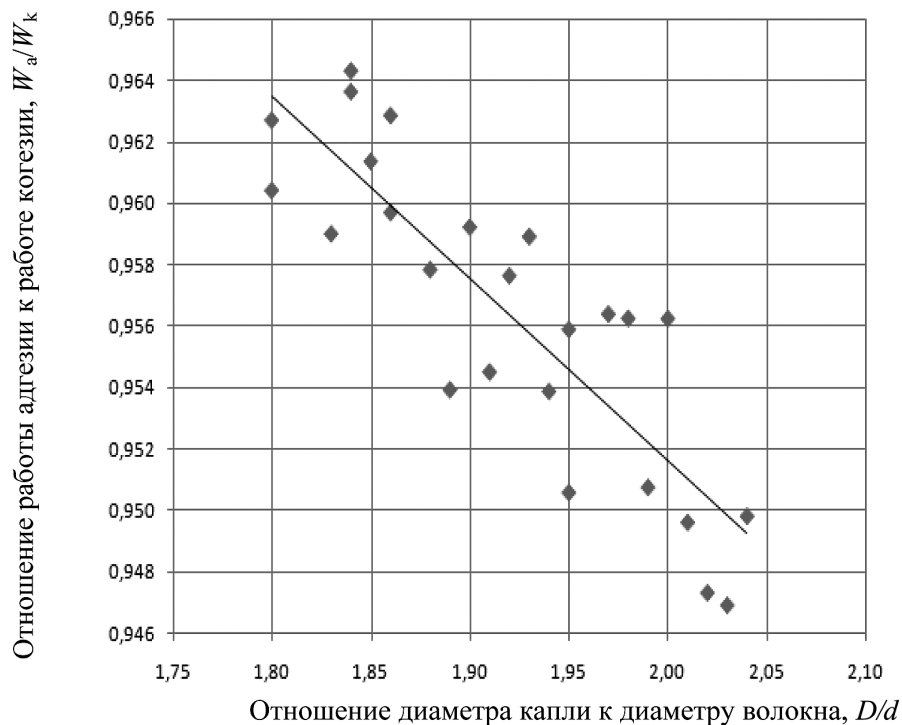


Рис. 3. Диаграмма зависимости отношения работы адгезии к работе когезии от отношения диаметра капли к диаметру волокна

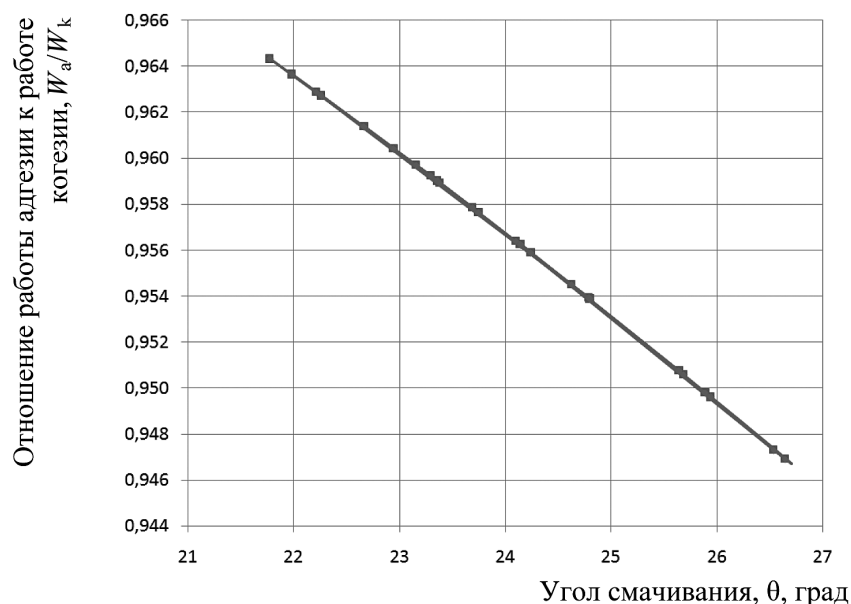


Рис. 4. Диаграмма зависимости отношения работы адгезии к работе когезии от угла смачивания в диапазоне $D/d = 1,80 \pm 2,05$

- равновесный краевой угол смачивания составил 22 ± 26 град с точностью до 1 град.

- отношение работы адгезии к работе когезии составило $0,950 \pm 0,962$ с точностью до 0,004.

Приведенный в данной статье подход предлагается использовать для определения равновесного краевого угла смачивания и проведения исследования оценки адгезионной прочности волокон и связующего других марок.

Работа выполнена на основании соглашения № 604248 о предоставлении гранта между ГП «КБ «Южное» и National Technical University of Athens (Греция), 7-я рамочная программа, шифр «Fiberalspres».

Литература

- [1] Карзов И. М. Влияние полиамидокислоты на адгезионные свойства эпоксиноволачного связующего и прочность полимерных композитов на его основе: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. хім. наук / Карзов Ілья Михайлович – Москва, 2011.
- [2] Yuan Yuehua. Contact angle and wetting properties / Y. Yuan, T. R. Lee. – P. 17.
- [3] Фролов Ю. Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы / Ю. Г. Фролов. – М.: Химия, 1988. – С. 85–86.
- [4] ГОСТ 6611.1-73. Нити текстильные. Метод определения линейной плотности.

Dudenkova A. A., Karpikova O. A., Gusarova I. O.

Yuzhnoye State-owned Design Office named after M. K. Yangel. Ukraine, Dnepr

THE ADHESIVE STRENGTH ASSESSMENT OF THE SYSTEM «FIBER – BINDING»

The article considers equilibrium contact angle research and an adhesivestrength assessment of the system “carbon fiber – epoxy binding”. This work will be interesting to engineers-researches in the field of composition products manufacturing: car, planes, rockers power components, and others. Investigations were carried out according to the procedure, developed in Yuzhnoye Space Design Office.

Keywords: Carbon fibers; a desktop electronic scanning microscope; the epoxy binding; an equilibrium contact angle of wetting; an adhesion strength.

References

- [1] Karzov I. M. Influence of polyamide acid to the adhesive properties of epoxy binder and the strength of polymer composites based on it: Thesis. Dis. on competition sciences. Degree candidate. Chem. Science / Karzov Ilya Mikhailovich – Moscow, 2011.
- [2] YuanYuehua. Contact angle and wetting properties / Y. Yuan, T. R. Lee. – P. 17.
- [3] Frolov G. Course of Colloid Chemistry. Surface phenomena and disperse systems / Y. G. Frolov. – M.: Chemistry, 1988. – P. 85–86.
- [4] GOST 6611.1-73. Textile threads. Method for determination of linear density.