УДК 620.178:620.22-419.8

В.А. Скачков, В.И. Иванов, О.С. Воденникова, Ю.В. Мосейко
Запорожская государственная инженерная академия, Украина
Тел.: 8(061) 2238324, *E-mail:* *colourmet@zgia.zp.ua*

УГЛЕРОД-АЛЮМИНИЕВЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ: ПОЛУЧЕНИЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Представлены результаты исследования плотности, твердости и коэффициентов трения углерод-алюминиевых композиционных материалов, модифицированных электролитическим никелем. Предложена методика расчета коэффициентов трения данных материалов. Решена задача диффузионного переноса смазывающего компонента в зону трения и получены соотношения для определения его распределения по толщине антифрикционного слоя, а также длительности работоспособности узла трения.
Ключевые слова: *углерод-алюминиевый композиционный материал, коэффициент трения, смазывающий компонент, узел трения, работоспособность.*

Введение

Углерод-алюминиевые композиционные материалы обладают низкой плотностью, а также высокой теплопроводностью, прочностью и износостойкостью, что обусловливает их применение в качестве функциональных элементов узлов трения высокоэнергетических установок [1].

Данные композиционные материалы можно получать как методом жидкофазного совмещения алюминиевой матрицы и углеродного волокнистого наполнителя, так и путем совместного горячего прессования углеродных волокон и алюминиевого порошка.

При жидкофазном совмещении расплава алюминия и углеродных волокон возможно их химическое взаимодействие, которое при температуре выше 600 °С сопровождается образованием карбида алюминия и, как следствие, снижением уровня механических характеристик углеродных волокон и прочности адгезионных связей на границе «волокно-матрица» [2].

Твердофазное формирование углерод-алюминиевых композиционных материалов методом горячего прессования вызывает необходимость создания достаточной адгезионной связи на границе «углерод-алюминий». Для этого на поверхность углеродного материала наносят покрытие на основе меди, никеля и хрома [3,4].

Целью работы является разработка структуры углерод-алюминиевых композиционных материалов, метода прогнозирования их коэффициентов трения, а также оценка работоспособности узлов трения, выполненных с использованием данных композиционных материалов.

Основное содержание и результаты работы

Экспериментальные исследования процессов электролитического омеднения, хромирования и никелирования выполняли на углеродных волокнах типа УКН-6000, представленных в виде жгута, состоящего из комплекса элементарных волокон. Реализацию электролитического нанесения защитных покрытий осуществляли на установке, описанной в работе [5]. Электролиты, применяемые для омеднения (I), хромирования (II) и никелирования (III) углеродных волокон, характеризовались нижеприведенным химическим составом, г/л: (I) 200 $CuSO_4 \cdot 5\ H_2O$, 60 H_2SO_4 и 50 HCl; (II) 400 $CrO_3 \cdot$ и 12 $KF \cdot 2H_2O$; (III) 70 $NiSO_4$; 45 $MgSO_4$ и 5 KCl соответственно. Процессы нанесения защитных покрытий на поверхность углеродных волокон реализованы при температуре 20…30 ºС.

Из анализа результатов экспериментов следует, что наиболее полно требованиям по защите углеродных волокон удовлетворяют никелевые покрытия, полученные при величине катодного тока 0,25 А/дм^2, напряжении электролиза 10 В и длительности процесса 120 с.

Для оценки надежности защитных покрытий проводили исследования разрывной нагрузки углеродных волокон с покрытием и без него. Разрывную нагрузку углеродных волокон определяли на машине МР-30. Базовая длина волокон составляла 130 мм, скорость нагружения – 30 мм/мин.

Установлено, что прочность на растяжение для углеродных волокон с покрытием была на 30…35 % больше, чем для без него, при этом величина разброса данного показателя относительно его среднего значения была на 20…25 % меньше.

Оценка математического ожидания распределения разрывной нагрузки для волокон без покрытия составляет 35,3 Н, волокон с покрытием – 44,7 Н. Оценка дисперсии распределения составляет соответственно 35,3 и 16,6. Применение никелевого покрытия обеспечивает увеличение среднего значения разрывной нагрузки волокон практически в два раза.

Для горячего прессования углерод-алюминиевых композиционных материалов на основе алюминиевого порошка ПА-0 и алюминиевой пудры ПАП использовали углеродное волокно с никелевым покрытием. Характеристики матричных компонентов указанных композиционных материалов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Химический (%) и гранулометрический состав (мкм) матричных компонентов углерод-алюминиевых композиционных материалов

Наименование	*Al*	*Fe*	*Si*	*Cu*	*Mn*	Влага	Гранулометрический состав
ПА-0	98,88	0,50	0,40	0,02	-	0,20	200…250
ПАП	98,99	0,35	0,40	0,05	0,01	0,20	1,0… 30,0

Прессование рассматриваемых композиционных материалов реализовали в закрытой пресс-форме при температуре 450 ºС и удельном давлении 60 МПа по классической технологии порошковой металлургии [6]. Состав данных материалов и их характеристики представлены в табл. 2.

Плотность прессованных углерод-алюминиевых композиционных материалов определяли методом гидростатического взвешивания по стандартной технологии. Твердость (по Бринеллю) определяли на твердомере типа ТШ-2М с использованием стального шарика диаметром 6 мм при величине нагрузки 1840 Н и длительности ее приложения – 30 с.

На твердость полученных углерод-алюминиевых композиционных материалов существенное влияние оказывает содержание углеродных волокон. Можно отметить, что при увеличении содержания углеродных волокон до 40 % твердость композиционных материалов снижается на 57 %. При дальнейшем увеличении содержания углеродных волокон до 60 % зафиксировано возрастание твердости данных композиционных материалов на 16 % относительно ее минимального значения.

Таблица 2. Зависимость свойств прессовок углерод-алюминиевых композиционных материалов от их состава

Состав углерод-алюминиевых композитов, %			Плотность прессовки, г/см^3	Твердость прессовки, Н/мм^2	Коэффициент трения, $k_{тр}$
Углеродное волокно	ПА-0	ПАП			
10	45	45	2,18	570	0,82
15	42	43	2,10	500	0,71
30	40	30	2,07	310	0,49
40	40	20	2,06	240	0,39
60	28	12	1,46	270	0,15

В формировании силы трения на поверхности скольжения участвуют все компоненты углерод-алюминиевых композиционных материалов. В этом случае сила трения имеет случайный характер и ее величину можно рассчитать по формуле:

$$F_{тр} = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i \cdot F_{тр}^i \ , \tag{1}$$

где $F_{тр}$, $F_{тр}^i$ – случайные силы трения композиционного материала и i-го компонента соответственно; λ_i – случайная индикаторная функция i-го компонента [7]; N – число компонентов.

Случайную силу $F_{тр}^i$ в соотношении (1) определяют как

$$F_{тр}^i = k_i \cdot \xi_{11}^i \ , \tag{2}$$

где k_i – коэффициент трения i-го компонента; ξ_{11}^i – случайное контактное напряжение i-го компонента в зоне трения.

Усредняя соотношения (1) с учетом выражения (2), можно записать:

$$< F_{тр} > = \sum_{i=1}^{N} < \lambda_i > \cdot < k_i > \cdot < \xi_{11}^i > \ ,$$

где $< ... >$ – оператор статистического осреднения.

Среднее значение контактного напряжения для i-го компонента можно рассчитать с использованием известной формулы [7]:

$$< \xi_{11}^i > = \sigma_{11} + \frac{< \hat{\lambda}_i \cdot \hat{\xi}_{11}^i >}{< \lambda_i >} \ , \tag{3}$$

де σ_{11} – среднее контактное напряжение углерод-алюминиевых композиционных материалов в зоне трения; $\hat{\lambda}_i$, $\hat{\xi}_{11}$ – пульсации индикаторной функции и микроструктурных напряжений соответственно.

Учитывая соотношение (3), силу трения на поверхности скольжения можно вычислить как

$$< F_{тр} > = \sum_{i=1}^{N} < \lambda_i > \cdot < k_i > \cdot \left[1 + \frac{< \hat{\lambda}_i \cdot \hat{\xi}_{11} >}{< \lambda_i > \cdot \sigma_{11}} \right] \cdot \sigma_{11} \ . \tag{4}$$

Определяя коэффициент трения как отношение силы трения к величине нормального усилия и используя уравнение (4), получаем:

$$< k_{mp} > = \sum_{i=1}^{N} < \lambda_i > \cdot < k_i > \cdot \left[1 + \frac{< \hat{\lambda}_i \cdot \hat{\xi}_{11} >}{< \lambda_i > \cdot \sigma_{11}} \right] . \tag{5}$$

Коэффициенты трения определяли на машине трения СМТ-1 с использованием системы «диск-колодка» при величине удельного давления 1,6 МПа и скорости относительного скольжения 3,0 м/с. Диск диаметром 60 мм выполняли из серого чугуна, образец углерод-алюминиевого композиционного материала – в виде колодки с размерами 16 х 11 х 10 мм. Сторону образца с размерами 16 х 10 мм подвергали предварительной притирке по рабочей поверхности диска. Температура в процессе исследования составляла 100 ± 10 ºС.

Экспериментальные значения коэффициентов трения и его расчетные величины, полученные с использованием формулы (5), представлены в табл. 2. Как следует из анализа данных табл. 2, значения коэффициентов трения углерод-алюминиевых композиционных материалов изменяются в широких пределах. Следовательно, данные материалы в зависимости от содержания углеродных волокон могут применяться как в качестве фрикционных, так и антифрикционных материалов.

Основной особенностью углерод-алюминиевых композиционных материалов, полученных методом горячего прессования, является наличие достаточной структурной пористости, которая, в основном, имеет транспортный характер. При заполнении пористой структуры такого материала смазывающим компонентом появляется возможность регулирования величины его коэффициентов трения и износа.

В процессе работы углерод-алюминиевых композиционных материалов в зоне трения реализуются процессы уноса смазывающего компонента. Как следствие, снижается концентрация данного компонента в зоне трения и появляется градиент концентрации по направлению, перпендикулярному к поверхности трения, что способствует созданию условий диффузии данного компонента из объема рассматриваемого композиционного материала.

Для оценки распределения смазывающего компонента по толщине рабочего элемента пары трения рассматривали задачу его диффузии, которая представляется следующими уравнениями:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \; ; \tag{6}$$

$$D \frac{\partial C}{\partial x} \bigg|_{x=0} = V_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot \tau) \; ; \tag{7}$$

$$D \frac{\partial C}{\partial x} \bigg|_{x=\ell} = V \; , \tag{8}$$

где C – концентрация смазывающего компонента; D – коэффициент диффузии; x, τ – соответственно координата, перпендикулярная к поверхности трения и длительность процесса; V_0 – начальная удельная скорость уноса смазывающего компонента в зоне трения; α – константа, связанная с интенсивностью уноса смазывающего компонента в зоне трения, $\alpha = -\left(\frac{1}{\alpha}\right) \cdot ln \left[\frac{I(\tau)}{V_0} \right]$, $I(\tau)$ – интенсивность уноса массы смазывающего компонента в зоне трения на момент времени τ; ℓ – толщина рабочего элемента пары трения; V – удельная скорость подачи смазывающего компонента на внешней поверхности.

Задача (6)-(8) классифицируется как задача без начальных условий, и ее решение имеет вид

$$C(x,\tau)=R(x)\cdot \exp\left(-\alpha\cdot\tau\right) ,$$

где $R(x)$ – функция, зависящая только от координаты *x*.

Граничные условия для данной функции можно записать как

$$D\frac{\partial R}{\partial x}\bigg|_{x=0}=V_0 \;;$$

$$D\frac{\partial R}{\partial x}\bigg|_{x=\ell}=V \;. \qquad (9)$$

После подстановки первого уравнения системы (9) в выражение (6) получают линейное уравнение второго порядка для функции $R(x)$, общее решение которого будет иметь вид:

$$C(x,\tau)=\left[V_0\cdot\sin(K\cdot x)+\frac{V_0\cdot\cos(K\cdot\ell)-V}{K\cdot\sin(K\cdot\ell)}\cdot\cos(K\cdot x)\right]\cdot\frac{\exp(-\alpha\cdot\tau)}{D} \;, \qquad (10)$$

где K – мнимая часть корня характеристического уравнения, $K=(\alpha/D)^{0{,}5}$.

Уравнение (10) описывает распределение концентрации смазывающего компонента по толщине рабочего элемента узла трения. Работоспособное состояние узла трения будет обеспечиваться до тех пор, пока выполняется условие

$$C(0,\tau)\geq C_{\min} \;, \qquad (11)$$

где $C_{\min}$ – минимально-допустимая концентрация смазывающего компонента.

При условии (11) уравнение (10) будет иметь вид:

$$C_{\min}=\left[\frac{V_0\cdot\cos(K\cdot\ell)-V}{K\cdot\sin(K\cdot\ell)}\cdot\cos(K\cdot x)\right]\cdot\frac{\exp(-\alpha\cdot\tau)}{D} \;. \qquad (12)$$

Из уравнения (12) несложно определить длительность состояния работоспособности узла трения τ_p:

$$\tau_p=-\frac{1}{\alpha}\cdot\ln\left[\frac{C_{\min}\cdot D\cdot K\cdot\sin(K\cdot\ell)}{V_0\cdot\cos(K\cdot\ell)-V}\right] \;. \qquad (13)$$

При отсутствии пополнения смазывающего компонента на внешней стороне рабочего элемента узла трения ($V=0$) длительность ее работоспособного состояния определяется выражением

$$\tau_p=-\frac{1}{\alpha}\cdot\ln\left[\frac{C_{\min}\cdot D\cdot K\cdot \mathrm{t}g(K\cdot\ell)}{V_0}\right] . \qquad (14)$$

Соотношения (13) и (14) устанавливают длительность работоспособного состояния узла трения при постоянных условиях, то есть с постоянной силой трения (постоянным коэффициентом трения).

Заключение

1. Установлены наиболее рациональные режимы модификации поверхности углеродных волокон электролитическим никелем, получены образцы углерод-алюминиевых композитов с содержанием углеродных волокон от 10 до 60 %.

2. Определены пределы изменения твердости и коэффициентов трения полученных композиционных материалов.

3. Разработана методика определения коэффициентов трения многокомпонентных композиционных материалов.

4. Получены соотношения, определяющие распределение смазывающего компонента по толщине антифрикционного слоя, а также соотношения, устанавливающие длительность состояния работоспособности узлов трения для композиционных материалов рассматриваемого типа.

Список литературы:

1. Технологічні аспекти виготовлення алюмінієвих композиційних матеріалів для деталей двигунів [Текст] / О.М. Шалай, В.М. Платонов, Ш.Л. Оборський та ін. // Вісті академії інженерних наук України. – 2006. – № 1 (28). – С. 59-64.
2. Структура и свойства композиционных материалов [Текст] : сб. науч. тр. / научн. ред. В.С. Портной. – М. : Машиностроение, 1979. – 253 с.
3. Салибеков С.Е. Исследование влияния никелевых покрытий на волокне на структуру и свойства композиционного материала алюминий-углеродное волокно [Текст] / С.Е. Салибеков, А.А. Заболоцкий // Волокнистые и дисперсно-упрочненные композиционные материалы. – М. : Наука, 1976. – С. 33-37.
4. Алюминиевые композиты триботехнического назначения, полученные методом вакуумно-компрессионной пропитки [Текст] / Л.Р. Вишняков, В.Л. Коханый, В.П. Мороз и др. // Композиционные материалы в промышленности : материалы XXIII междунар. конф. – Ялта, 2003. – С. 161-162.
5. Особенности получения триботехнических углерод-алюминиевых композитов методами порошковой металлургии [Текст] / В.А. Скачков, С.А. Воденников, С.С. Сергиенко и др. // Проблеми трибології. – 2010. – № 4. – С. 91-94.
6. Деякі аспекти одержання вуглець-алюмінієвих композиційних матеріалів триботехнічного призначення [Текст] / В.О. Скачков, С.А. Воденніков, В.І. Іванов та ін. // Металургія : наукові праці ЗДІА. – РВВ ЗДІА, 2011. – Вип. 25. – С. 116-120.
7. Волков С.Д. Статистическая механика композитных материалов [Текст] / С.Д. Волков, В.П. Ставров – Минск : БГУ, 1978. – 206 с.

Надійшла до редколегії 26.01.2012.

В.О. Скачков, В.І. Іванов, О.С. Воденнікова, Ю.В. Мосейко

ВУГЛЕЦЬ-АЛЮМІНІЄВІ КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ: ОДЕРЖАННЯ ТА ТРИБОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Подано результати досліджень щільності, твердості та коефіцієнтів тертя вуглець-алюмінієвих композитів, модифікованих електролітичним нікелем. Запропоновано методику розрахунку коефіцієнтів тертя зазначених матеріалів. Вирішено задачу дифузійного перенесення змащуючого компонента у зону тертя й отримано співвідношення для визначення його розподілу за товщиною антифрикційного шару, а також тривалості працездатності вузла тертя.

Ключові слова: *вуглець-алюмінієвий композиційний матеріал, коефіцієнт тертя, компонент, що змащує, вузол тертя, працездатність.*

V.A. Skachcov, V.I. Ivanov, O.S. Vodennikova, Yu.V. Mosejko

CARBON-ALUMINUM COMPOSITE MATERIALS: PRODUCTION AND TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS

There are presented the results of research for density, hardness and friction coefficients of carbon-aluminum composite materials, modified by an electrolytic nickel. It is offered the method for calculation of friction coefficients of this materials. The task of diffused transfer of oiling component in the area of friction and correlation for determination of his distributing on the thickness of antifrictional layer, and also duration of working capacity of friction unit are deduced.

Keywords: *carbon-aluminum composite material, friction coefficient, oiling component, friction init, working capacity.*