

## ТЕХНІЧНІ НАУКИ

УДК 661.666.4

DOI: 10.15587/2313-8416.2017.88681

**ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

© В. О. Скачков, О. Р. Бережна, О. С. Воденникова

*Разработана методика прогнозирования коэффициентов трения многокомпонентных композиционных материалов. Представлены расчетные и экспериментальные значения триботехнических характеристик углерод – алюминиевых, металло-керамических и бронз-фторопластовых композиционных материалов. Установлено максимальное отклонение расчетных и экспериментальных значений коэффициентов трения, которое составляет 12 %*

**Ключевые слова:** композиционный материал, прогнозирование, коэффициент трения, триботехнические характеристики, давление, пористость, скорость скольжения

**1. Введение**

Создание триботехнических материалов с широким диапазоном значений коэффициентов трения возможно на основе многокомпонентных композитов. Из многообразия компонентов композита появляется возможность получения материалов с требуемыми триботехническими характеристиками. Эффективность получения требуемых композиционных материалов напрямую зависит от точности методов прогнозирования коэффициентов трения и интенсивности износа.

Решение задачи прогнозирования триботехнических характеристик композиционных материалов является актуальной задачей, особенно, в направлении разработки структур и подбора компонентов композита с известными механическими и триботехническими характеристиками.

**2. Литературный обзор**

Известны триботехнические композиционные материалы на основе карбида кремния [1], политетрафторэтилена [2], спеченных порошков титана [3], медных сплавов [4] нитрида бора [5], малонаполненного фенилона [6]. В работах [7, 8] предложена модель расчета коэффициентов трения многокомпонентных композиционных материалов. Авторы предлагают микроструктурный подход, в котором учитываются расположение компонентов композита, их упругие и прочностные характеристики, коэффициенты трения.

Аналогичные подходы были предложены для математических методов моделирования процессов трения [9, 10]. В работах показано, что износ материала соответствует усталостному разрушению, которое характеризуется процессом накопления микроструктурных разрушений с учетом коэффициентов линейного термического расширения отдельных компонентов композита.

Процессы прогнозирования и расчета основных служебных характеристик, в частности износа материалов, при проектировании новых типов машин, позволяют выявить требования к физико-механическим свойствам узлов трения с учетом заданных условий работы. При этом можно научно обосновано подбирать материалы и расчетным путем определять ресурс машин еще на стадии проектирования без долгосрочных и дорогостоящих испытаний.

Авторы работ [11, 12] подошли к моделированию процессов износа многокомпонентного композиционного материала с точки зрения решения статической задачи микромеханики композитов.

Прогнозирование коэффициента трения реальных КМ предложено в работе [13], предложенный подход базируется на предположении, что сила трения многофазных материалов определяется не только коэффициентами трения отдельных фаз и их соотношением на поверхности трения, но и коэффициентами распределения нагрузки между фазами. Однако если частицы наполнителя выкрашиваются в процессе трения, образуя в контактной зоне третье тело, содержащее хрупкие включения, то расчет коэффициентов трения носит искаженный характер.

**3. Цель и задачи исследования**

Цель работы - на основе моделирования многокомпонентных композиционных материалов средней класса  $B_2$ , в котором вводятся элементы первого и второго порядка малости, разработать методику прогнозирования коэффициентов трения и дать оценку его точности методом сравнения с экспериментальными данными.

Для достижения цели исследования были поставлены следующие задачи:

1. Для многокомпонентных композиционных материалов на основе углерода, порошков алюминия

и бронзы, оксидов алюминия и циркония, карбида титана рассчитать значения коэффициентов трения.

2. Дать оценку точности проведенных расчетов путем сравнения с экспериментальными данными

#### 4. Разработка методики прогнозирования коэффициентов трения

В зоне трения каждый компонент многокомпонентных композиционных материалов формирует индивидуальную силу трения.

В этом случае сила трения на единичной площадке трения будет иметь случайный характер и определяется по формуле:

$$F_{mp} = \sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot F_{mp}^i, \quad (1)$$

где  $F_{mp}$ ,  $F_{mp}^i$  – случайные силы трения композита и  $i$ -го компонента соответственно;  $\lambda_i$  – случайная индикаторная функция  $i$ -го компонента [14];  $N$  – число компонентов.

В соотношении (1) случайная сила  $F_{mp}^i$  на единичной площадке определяется:

$$F_{mp}^i = k_i \cdot \xi_{11}^i, \quad (2)$$

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

Усредняя соотношение (1) с учетом выражения (2), будем иметь:

$$F_{mp} = \sum_{i=1}^N \langle \lambda_i \rangle \cdot \langle k_i \rangle \cdot \langle \xi_{11}^i \rangle, \quad (3)$$

где  $\langle \dots \rangle$  – оператор статистического осреднения.

Среднее значение контактного напряжения для  $i$ -го компонента можно вычислить с использованием известной формулы [14]:

$$\langle \xi_{11}^i \rangle = \sigma_{11} + \frac{\langle \hat{\lambda}_i \cdot \hat{\xi}_{11} \rangle}{\langle \lambda_i \rangle}, \quad (4)$$

где  $\sigma_{11}$  – среднее контактное напряжение в зоне трения;  $\hat{\lambda}_i = \lambda_i - \langle \lambda_i \rangle$  – пульсация индикаторной функции;  $\hat{\xi}_{11}^i = \xi_{11}^i - \langle \xi_{11}^i \rangle$  – пульсация случайного напряжения  $i$ -го компонента композита.

Учитывая соотношение (4), силу трения в зоне скольжения можно рассчитать как:

$$\langle F_{mp} \rangle = \sum_{i=1}^N \langle \lambda_i \rangle \cdot \langle k_i \rangle \cdot \left[ 1 + \frac{\langle \hat{\lambda}_i \cdot \hat{\xi}_{11}^i \rangle}{\langle \lambda_i \rangle \sigma_{11}} \right] \cdot \sigma_{11}. \quad (5)$$

Определяя коэффициент трения как отношение силы трения к величине нормального усилия, из уравнения (5) получаем:

$$k_{mp} = \sum_{i=1}^N \langle \lambda_i \rangle \cdot \langle k_i \rangle \cdot \left[ 1 + \frac{\langle \hat{\lambda}_i \cdot \hat{\xi}_{11}^i \rangle}{\langle \lambda_i \rangle \sigma_{11}} \right]. \quad (6)$$

#### 5. Экспериментальные исследования

Для оценки точности расчетов по формуле (6) методом горячего прессования изготовлено четыре партии углерод-алюминиевых композиционных материалов. Давление прессования составляло 25,5 МПа, температура пресса – 450±20 °С.

Показатели индивидуальных характеристик компонентов приводятся в табл. 1, а состав полученных композиционных материалов и их триботехнические характеристики в табл. 2.

Таблица 1

Показатели индивидуальных характеристик исходных компонентов углерод-алюминиевых композиционных материалов

Материал	Давление, МПа	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона	Коэффициент трения
Чешуйчатый графит	0,5	6,0	0,20	0,04
	2,5			0,05
	3,5			0,05
Графит	0,5	8,5	0,24	0,10
	2,5			0,11
	3,5			0,12
Глинозём	0,5	374	0,22	0,17
	2,5			0,18
	3,5			0,18
Al-я пудра	0,5	302	0,22	0,08
	2,5			0,09
	3,5			0,09
Никель	0,5	210	0,23	0,13
	2,5			0,13
	3,5			0,13
Al-й порошок	0,5	71	0,25	0,24
	2,5			0,24
	3,5			0,26
Карбид титана	0,5	320	0,25	0,25
	2,5			0,25
	3,5			0,26

Таблица 2

**Состав углерод-алюминиевых композитов и их триботехнические характеристики**

№ партии образцов	Состав, % объемн.						НВ, МПа		Давление, МПа	Коэффициент трения		
	ЧГ	Г	ПАВ	ПА	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiC	Среднее значение	Коэф-т вариации		Расчёт	Опыт	Погрешность, %
1	10	75	15	-	-	-	778	0,04	0,5	0,108	0,11	1,8
									2,5	0,110	0,10	10,0
									3,5	0,118	0,11	7,3
2	15	30	40	15	-	-	1326	0,07	0,5	0,111	0,12	7,5
									2,5	0,116	0,13	10,8
									3,5	0,122	0,13	6,2
3	15	-	-	25	60	-	840	0,07	0,5	0,308	0,29	6,2
									2,5	0,330	0,31	6,5
									3,5	0,330	0,32	3,1
4	23	23	-	15,5	-	38,5	2918	0,11	0,5	0,251	0,26	3,5
									2,5	0,255	0,27	5,6
									3,5	0,264	0,26	1,5

Из анализа табл. 2 следует, что отклонение расчётных данных по формуле (6) и экспериментальных данных находится в пределах 11 %. Такое отклонение вполне допустимо для реализации инженерных расчётов.

В работах [3, 4] предложены экспериментальные значения коэффициентов трения металлокерамических и пористых двухкомпонентных композитов. В табл. 3 представлены характеристики индивидуальных компонентов композита.

Таблица 3

**Индивидуальные характеристики компонентов композита**

Компонент	Условия трения		Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Коэффициент трения
	P, МПа	V, м/сек			
Титанмагнийевый сплав	1	2	120	0,32	0,15
Карбид циркония	1	2	412	0,30	0,50
Бронза	2	1	100	0,33	0,14
	4	1	100	0,33	0,16
Фторопласт (Ф4)	2	1	0,41	0,30	0,04
	4	1	0,41	0,30	0,08

На рис. 1 представлены расчётные и экспериментальные данные коэффициентов трения двухкомпонентного композита на основе титанмагниевого сплава и карбида циркония для давления 1,0 МПа и скорости относительного скольжения 2 м/сек.

Максимальное отклонение расчётных и экспериментальных значений коэффициента трения не превышает 12 %.

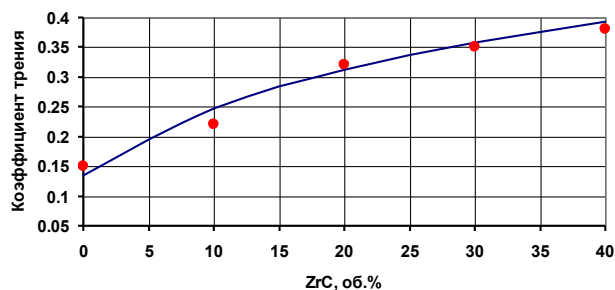


Рис. 1. Влияние объёмной концентрации ZrC на коэффициенты трения: — — расчётные данные; ● — экспериментальные данные [3]

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента трения пористых образцов из бронзового порошка, пропитанных фторопластом Ф4, от уровня пористости для давления 2 и 4 МПа.

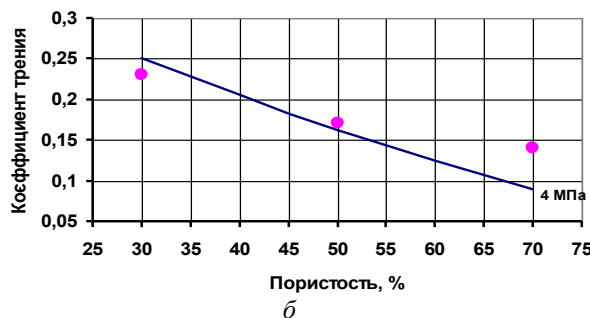
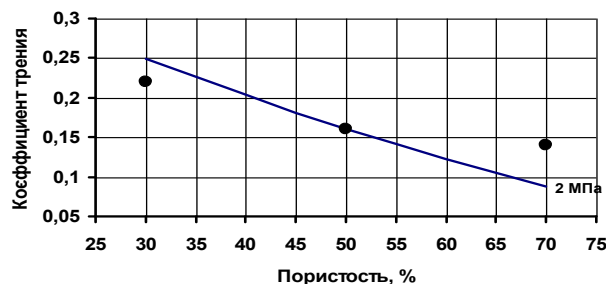


Рис. 2. Влияние пористости образцов бронзы, пропитанных фторопластом, на коэффициенты трения: а — при давлении 2МПа; б — при давлении 4МПа; — — расчётные данные; ● — экспериментальные данные [4]

При уровне пористости 30 % превышение расчётных значений коэффициента трения над экспериментальными составляет 9 %. При пористости 70 % экспериментальные значения коэффициентов трения выше расчётных на 37 %. Такое отклонение возможно объяснить не полным заполнением крупных макроскопических пор низко модульным фторопластом Ф4.

### 5. Результаты исследования

Для углерод-алюминиевых композиционных материалов расчётные значения коэффициентов трения отклоняются от экспериментальных не более 10,8 %.

Экспериментальные значения коэффициентов трения для углеродных композитов с включением компонентов из оксида алюминия отличаются от расчётных не более 6,5 %.

Наибольшее отклонение расчётных и экспериментальных значений коэффициентов трения достигают 37 % для пористых бронзо-фторопластовых композитов. Такое отклонение связано с наличием

объёма пор, которые не заполнены компонентом из фторопласта.

### 6. Выводы

Разработана методика прогнозирования коэффициентов трения для многокомпонентных композиционных материалов. Сравнительный анализ расчётных, полученных по разработанной методике, и экспериментальных значений коэффициентов трения показал, что их отклонение составляет не более 11 %.

Определены расчётные и экспериментальные значения коэффициентов трения углерод-алюминиевых композитов с использованием оксидных и карбидных компонентов. Разница расчётных и экспериментальных значений составляет не более 10,8 %.

Предложенный подход позволяет по исходным данным известных компонентов формировать новую структуру композита, обеспечивающую требуемые триботехнические характеристики.

### Литература

1. Кольцова, Я. І. Склокерамічні матеріали триботехнічного призначення на основі карбиду кремнію [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Я. І. Кольцова. – Український державний хіміко-технологічний університет. – Дніпропетровськ, 2001. – 19 с.
2. Петрова, П. Н. Разработка машиностроительных триботехнических материалов на основе политетрафторэтилена и природных цеолитов якутских месторождений [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / П. Н. Петрова. – Якутск, 2002. – 168 с.
3. Францевич, И. Н. Антифрикционные композиции на основе спечённого титана [Текст] / И. Н. Францевич, Д. М. Карпинос, Л. И. Тучинский, Л. Ф. Колесниченко, А. И. Юга, А. Б. Сапожников, Л. Р. Вишняков // Порошковая металлургия. – 1978. – № 1. – С. 61–65.
4. Ненахов, А. В. Триботехнические характеристики материалов на основе бронзы для малогабаритных узлов трения [Текст] / А. В. Ненахов, А. Г. Косторнов // Порошковая металлургия. – 2003. – Т. 7, № 8. – С. 60–64.
5. Найдич, Ю. В. Триботехнические свойства сверхтвёрдых материалов на основе нитрида бора в контакте с твёрдыми сплавами [Текст] / Ю. В. Найдич, А. Г. Косторнов, А. А. Адамовский, В. Т. Варченко, А. Д. Костенко // Порошковая металлургия. – 2011. – Т. 5, № 6. – С. 105–112.
6. Буря, А. И. Исследование эксплуатационных характеристик малонаполненного фенилона [Текст] / А. И. Буря, Н. Т. Арламова, А. А. Буря, В. В. Ильющенок, И. Н. Черский // Трение и износ. – 1997. – Т. 18, № 5. – С. 655–662.
7. Скачков, В. А. Микроструктурный подход к прогнозированию триботехнических характеристик многокомпонентных композитов [Текст]: тр. междунар. конф. / В. А. Скачков, В. И. Иванов. – Самара: СТУ, 2007. – Т. 3. – С. 472–473.
8. Самарский, А. А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры [Текст] / А. А. Самарский, А. Г. Михайлов. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.
9. Майер, Р. В. Компьютерное моделирование физических явлений [Текст]: монография / Р. В. Майер. – Глазов: ГГПИ, 2009. – 112 с.
10. Скачков, В. А. Исследование процесса износа фрикционных изделий на основе композитов [Текст]: междунар. науч.-практ. конф. / В. А. Скачков, В. И. Иванов, В. М. Печеникова // Наука в информационном пространстве. – 2010. – Т. 1. – С. 87–89.
11. Nikitin, Yu. A. Technological aspects of creation lightweight composite materials for aerospace applications [Text] / Yu. A. Nikitin, V. V. Zaporozhets // Problems of friction and wear. – 2008. – Vol. 50. – P. 149–156.
12. Axen, N. Analysis of abrasive wear and friction behaviour of composites [Text] / N. Axen, I. M. Hutchings // Materials Science and Technology. – 1996. – Vol. 12, Issue 9. – P. 757–765. doi: 10.1179/026708396790122413
13. Богачев, И. Н. Введение в статистическое металловедение [Текст] / И. Н. Богачев, А. А. Вайнштейн, С. Д. Волков. – М.: Металлургия, 1972. – 216 с.
14. Волков, С. Д. Статистическая механика композиционных материалов [Текст] / С. Д. Волков, В. П. Ставров. – Минск: БГУ, 1978. – 206 с.

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук, професор Критська Т. В.  
Дата надходження рукопису 16.12.2016*

**Скачков Виктор Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент, кафедра металлургии, Запорожская государственная инженерная академия, пр. Соборный, 226, г. Запорожье, Украина, 69006  
E-mail: vaskachkov@ukr.net

**Бережная Ольга Руслановна**, кандидат технических наук, доцент, кафедра металлургии, Запорожская государственная инженерная академия, пр. Соборный, 226, г. Запорожье, Украина, 69006  
E-mail: berolgar@ukr.net

**Воденникова Оксана Сергеевна**, кандидат технических наук, доцент, кафедра металлургии, Запорожская государственная инженерная академия, пр. Соборный, 226, г. Запорожье, Украина, 69006  
E-mail: colourmet@zgia.zp.ua