

При этом предложенный ОР может быть применен для измерения электрофизических характеристик органических образцов. Говорить об этом мы можем потому, что диаметр цилиндрического образца, расположенного вдоль оси резонансной системы, будет значительно меньше диаметра круглого волновода, выполненного в центре одного из зеркал резонансной системы. Так в данном конкретном случае диаметр

этого волновода составляет 24 мм, в то время, как диаметр цилиндрического образца равен всего 5 мм. Кроме того, поскольку диаметр круглого волновода в центре плоского зеркала однозначно определяется геометрией резонатора и рабочей длиной волны, рассматриваемый ОР будет наиболее перспективен в коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн.

### Литература

1. Техника субмиллиметровых волн / [Валитов Р.А., Дюбко С.Ф., Камышан В.В. и др.]; под ред. Р.А. Валитова. – М.: Сов. радио, 1969.– 480 с.
2. Кузьмичев И.К. Выбор диаметра зонда для исследования распределений поля в малоапертурных открытых резонаторах / И.К. Кузьмичев // Радиофизика и электроника: сб. науч. тр. / НАН Украины. Ин-т радиофизики и электроники. – Харьков, 2000. – Т. 5, № 2. – С. 92-95.
3. Афонин Д.Г. Исследование резонансной системы для лазера на свободных электронах / Д.Г. Афонин, В.Г. Богомолов, Н.Д. Бояринцев [и др.] // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1989. – Вып. 3. – С. 14-16.

*Проаналізовано точні та наближені моделі прогнозування коефіцієнтів тертя й інтенсивності зносу багатокomпонентних композиційних матеріалів триботехнічного призначення. Виконано оцінку точності запропонованих моделей*  
**Ключові слова:** багатокomпонентні композиційні матеріали, коефіцієнт тертя, інтенсивність зносу

*Проанализированы точные и приближенные модели прогнозирования коэффициентов трения и интенсивности износа многокомпонентных композиционных материалов триботехнического назначения. Выполнена оценка точности предложенных моделей*  
**Ключевые слова:** многокомпонентные композиционные материалы, коэффициент трения, интенсивность износа

*There are analysed exact and approximate models for prognostication of friction coefficients and intensity of wear for multicomponent composite materials of the tribotechnical function. The assessment of offered models accuracy was executed*  
**Keywords:** multicomponent composite materials, friction coefficient, intensity of wear

УДК 620.22-419.8

## АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТОВ

**В. А. Скачков**

Кандидат технических наук, доцент  
 Кафедра металлургии цветных металлов\*\*  
 Контактный тел.: (06 12) 223-83-10  
 E-mail: colourmet@zgia.zp.ua

**Г. А. Баглюк**

Доктор технических наук, заместитель  
 директора по науке  
 Институт проблем материаловедения НАН Украины  
 Контактный тел.: (044)-424-15-34  
 E-mail: gbag@rambler.ru

**О. С. Воденникова**

Ассистент\*  
 Контактный тел.: (06 12) 223-82-50  
 E-mail: mf@zgia.zp.ua

**В. И. Иванов**

Старший научный сотрудник\*  
 Контактный тел.: (06 12) 223-83-24  
 E-mail: colourmet@zgia.zp.ua

\*Кафедра металлургии черных металлов  
 \*\*Запорожская государственная инженерная академия  
 пр. Ленина, 226, г. Запорожье, Украина, 69006

**1. Введение**

Ужесточение режимов эксплуатации узлов трения, связанное с повышением нагрузок, температур и других параметров, вызывает необходимость повышения износостойкости, снижения или стабилизации коэффициентов трения.

В настоящее время вопросы прогнозирования износостойкости и коэффициентов трения многокомпонентных композиционных материалов требуют дальнейшей разработки [1-3].

О прогнозировании износа на основе энергетического подхода описано в работе [3]. В работе [4] изложен подход к прогнозированию триботехнических характеристик на основе последовательных масштабных уровней.

**2. Постановка задачи**

Произвести оценку точных и приближенных моделей прогнозирования триботехнических характеристик по экспериментальным значениям для различных серий многокомпонентных композиционных материалов.

**3. Основная часть исследований**

Триботехнические характеристики многокомпонентных композиционных материалов задаются свойствами компонентов и их расположением в объеме.

Наиболее полно учитываются структурно-механические характеристики компонентов композита в пределах модели структурно-неоднородных сред класса В<sub>2</sub>, когда учитываются масштабные уровни первого и второго порядка малости. На масштабном уровне второго порядка задаются характеристики каждого компонента. Поверхность трения является микронеоднородной, отличающейся на масштабном уровне второго порядка модулями упругости, коэффициентами трения и величинами интенсивности износа.

Учитывая статистический характер распределения модулей упругости, контактного давления и коэффициентов трения компонентов композита, из реше-

ния контактной задачи микромеханики композитов можно записать [5,6]:

$$k_{тр} = \sum_{i=1}^N \langle \lambda_i \rangle \langle k_i \rangle \cdot \left[ 1 + \frac{\tilde{\lambda}_i \cdot \tilde{\xi}_i}{\langle \lambda_i \rangle \cdot \sigma_{11}} \right] \cdot \sigma_{11} , \quad (1)$$

где  $k_{mp}$  – коэффициент трения композита;  $\lambda_i, k_i, \xi_i$  – индикаторная функция, коэффициент трения и микронапряжение в компоненте с номером  $i$  соответственно;  $\sigma_{11}$  – макроскопическое контактное давление;  $\langle xxx \rangle$  – оператор статистического осреднения.

Оценивая влияние второго слагаемого в уравнении (1), учитывающего поправку от действия упругих характеристик компонентов композита, появляется возможность значительного упрощения прогнозирования коэффициентов трения композита в целом.

Вводя технические значения модулей упругости компонентов и метод вычисления макроскопических упругих характеристик, представленный в работе [5], получают уравнение вида

$$k_{тр} = \sum_{\alpha=1}^N k_{\alpha} \cdot p_{\alpha} \cdot \frac{(E_{\alpha} - E^*)}{E^*} , \quad (2)$$

где  $E^*$  – макроскопические модули упругости;  $p_{\alpha}, E_{\alpha}$  – объемное содержание и модули упругости компонента композита с номером  $\alpha$  соответственно.

Исходные данные для расчетов представлены в табл. 1. Опытные значения коэффициентов трения, а также значения, рассчитанные по формулам (1) и (2), приведены в табл. 2.

Таблица 1

Состав серий композитов и свойства компонентов

Компо- ненты	Кон- тактное давление, МПа	Коэф- фициент трения	Интен- сивность износа, 10 <sup>3</sup> , г/с <sup>2</sup> ·мм	Состав композитов по сериям, %					
				1	2	3	4	5	6
Чешуй- чатый графит	0,5	0,04	2,5	9,96	9,96	4,98	14,97	9,96	3,88
	2,5	0,05	4,7						
	3,5	0,05	5,6						
Графит	0,5	0,10	1,0	69,96	19,98	-	-	4,98	8,67
	2,5	0,11	1,8						
	3,5	0,12	1,9						
Оксид алюми- ния	0,5	0,17	0,1	-	10,0	82,96	72,96	10,0	13,0
	2,5	0,18	4,1						
	3,5	0,18	5,2						
Алюми- ниевый порошок	0,5	0,24	0,2	20,0	60,0	12,0	12,0	10,0	74,40
	2,5	0,24	6,3						
	3,5	0,26	8,5						
Карбид титана	0,5	0,25	0,08	-	-	-	-	64,7	-
	2,5	0,25	0,15						
	3,5	0,25	0,25						
Никель	0,5	0,13	0,5	0,08	0,06	0,06	0,05	0,09	0,05
	2,5	0,13	2,0						
	3,5	0,13	3,0						

Таблица 3

Из анализа данных табл. 2 следует, что среднее значение коэффициентов трения, вычисленных по формуле (1), отличается от средних значений, определенных экспериментально, на 9,6 %, а значения, рассчитанные по формуле (2) – на 12 %.

Следовательно, формула (2) вполне приемлема для экспертных оценок коэффициентов трения многокомпонентных композитов.

В работе [7] показано, что интенсивность износа пропорциональна величине контактного давления. Обобщая результаты на многокомпонентные композиты, интенсивность износа можно записать как:

$$I^K = \sum_{z=1}^N I_z \cdot k_z \cdot \langle \xi_{jj}^z \rangle \cdot \frac{P_z}{k_{тр} \cdot \sigma_{jj}}, \quad (3)$$

где  $\langle \xi_{jj}^z \rangle$ ,  $\sigma_{jj}$  – средние контактные напряжения компонента композита с номером  $z$  и макроскопические напряжения в зоне трения соответственно;  $I^K$ ,  $I_z$  – интенсивность износа композита и компонента с номером  $z$  соответственно.

Опытные и расчетные значения интенсивности износа,  $10^{-5} \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{ч})$

Контактное давление, МПа	Способ определения	Серии композитов					
		1	2	3	4	5	6
0,5	расчет	2,00	1,58	1,23	1,47	1,38	1,34
	опыт	1,50	2,10	1,12	2,03	1,74	1,54
2,5	расчет	4,03	6,06	5,45	5,05	2,74	6,61
	опыт	2,20	6,00	6,02	8,00	3,01	7,22
3,5	расчет	4,65	7,59	6,65	6,69	3,22	8,42
	опыт	2,80	7,50	11,20	10,60	4,12	9,14

#### 4. Заключение

Рассмотрены точные и приближенные методы прогнозирования коэффициентов трения и интенсивности износа. Опытным путем установлена точность предложенных моделей.

Таблица 2

Опытные и расчетные значения коэффициентов трения

Определение коэффициента трения	Давление, МПа	Серии композитов					
		1	2	3	4	5	6
Формула (1)	0,5	0,131	0,135	0,362	0,308	0,419	0,164
	2,5	0,133	0,142	0,386	0,320	0,425	0,173
	3,5	0,143	0,148	0,486	0,330	0,440	0,180
Формула (2)	0,5	0,135	0,141	0,367	0,312	0,421	0,165
	2,5	0,136	0,143	0,375	0,321	0,427	0,172
	3,5	0,149	0,144	0,380	0,334	0,452	0,181
Опыт	0,5	0,120	0,130	0,350	0,270	0,380	0,172
	2,5	0,120	0,140	0,360	0,270	0,390	0,180
	3,5	0,130	0,140	0,360	0,290	0,400	0,190

#### Литература

1. Браун, Э. Д. Моделирование трения и изнашивания в машинах [Текст] / Э. Д. Браун, Ю. А. Евдокимов, А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 191 с. – Библиогр.: с. 188-190.
2. Любин, А. Г. Трибоконтактные задачи для подшипников скольжения с учетом износа вала [Текст] / А. Г. Любин // Проблемы трибологии. – 1999. – № 1. – С. 18-32.
3. Погодаев, Л. И. Структурно-энергетические модели надежности материалов и деталей машин [Текст] / Л. И. Погодаев, В. Н. Кузьмин. – С.Прб.: А.Т.Р.Ф., 2006. – 607 с. – Библиогр.: с. 571-588.
4. Ковшов, А. Г. Физическая модель разрушения поверхностей трения [Текст] / А. Г. Ковшов // Актуальные проблемы трибологии: сб. тр. – М.: Машиностроение, 2007. – С. 206-213.
5. Волков, С. Д. Статистическая механика композитных материалов [Текст] / С. Д. Волков, В. П. Ставров. – Минск: БГУ, 1978. – 206 с. – Библиогр.: с. 204-205.
6. Скачков, В. А. Метод прогнозирования коэффициентов трения многокомпонентных композитов [Текст] / В. А. Скачков, Р. А. Шаповалов, Е. В. Скачков // Металлургия: научные труды ЗГИА. – 2001. – Вып. 4. – С. 78-81.
7. Кузьменко, А. Г. Метод подобия в решении контактных задач для тел двойной кривизны [Текст] / А. Г. Кузьменко // Проблемы трибологии. – 2008. – № 2. – С. 25-35.

Величину износа образцов композиционных материалов определяли на машине трения СМТ-1 по системе «диск-колодка». Диск диаметром 50 мм выполняли из серого чугуна, а колодку – из исследуемого композита с предварительной притиркой по радиусу 25 мм. Скорость относительного скольжения составляла 3,0 м/с, температуру образца контролировали термометрическим термометром типа ХК, рабочий спай которого размещали на расстоянии 1,0 мм от поверхности трения, и поддерживали в интервале 30...35 °С.

Опытные и расчетные значения интенсивности износа композитов и их значения, рассчитанные по формуле (3), представлены в табл. 3. Отклонения средних величин опытных и расчетных интенсивностей износа составляет 10 %. Такая точность вполне удовлетворяет инженерным методам прогноза интенсивности износа.