

УДК 620.178:620.22-419.8

О.С. ВОДЕННИКОВА

Запорожская государственная инженерная академия

## ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Проанализированы существующие модели прогнозирования коэффициентов трения композиционных материалов триботехнического назначения. Предложена методика расчётного определения коэффициентов трения многокомпонентных композиционных материалов. Проведена оценка точности предложенной модели для различных видов композиционных материалов.*

*Ключевые слова: композиционный материал, коэффициент трения, математическая модель, оценка точности, характеристика, компонент.*

О.С. ВОДЕННИКОВА

Запорізька державна інженерна академія

## ОЦІНКА АДЕКВАТНОСТІ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗУВАННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ТЕРТЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

*Проаналізовано існуючі моделі прогнозування коефіцієнтів тертя композиційних матеріалів триботехнічного призначення. Запропоновано методику розрахункового визначення коефіцієнтів тертя багатоконпонентних композиційних матеріалів. Проведено оцінку точності запропонованої моделі для різних видів композиційних матеріалів.*

*Ключові слова: композиційний матеріал, коефіцієнт тертя, математична модель, оцінка точності, характеристика, компонент.*

O.S. VODENNIKOVA

Zaporozhye State Engineering Academy

## EVALUATION OF ADEQUACY OF MODELS FOR FORECASTING FRICTION COEFFICIENTS OF COMPOSITE MATERIALS

*The existing models for predicting friction coefficients of composites for tribotechnical purposes are analyzed. A technique for calculating friction coefficients of multicomponent composite materials is proposed. The accuracy of the proposed model for various types of sintered materials is proposed.*

*Keywords: composite material, coefficient of friction, mathematical model, accuracy estimation, characteristic, component.*

### Постановка проблемы

Современное развитие машиностроения и других отраслей промышленности Украины требует создания материалов, обладающих механической прочностью при высоких нагрузках, повышенной износостойкостью, термостойкостью, малой плотностью, возможностью регулирования теплопроводности в широких пределах и хорошими электрофизическими свойствами.

### Анализ последних исследований и публикаций

Композиционные материалы (КМ) могут состоять из двух и более компонентов. Совместная работа разнородных компонентов дает эффект, равносильный созданию нового материала, свойства которого количественно и качественно отличаются от свойств каждого из составляющих компонентов материала [1]. При этом, существенная особенность композиционных материалов заключается в том, что их свойства являются проектируемыми.

В основу теоретических и модельных представлений о процессах трения были положены экспериментальные результаты и законы трения ДаВинчи, Амонтона и Кулона.

В соответствии с представлениями Боудена и Тейлора, трение представляет собой не только процесс взаимодействия двух поверхностей, однако и вовлекает материал глубиной до тысяч атомных слоев и, в связи с этим, зависит от объемных характеристик материалов трущихся поверхностей [2].

В работах [3] Suh и Sin предложили собственную модель для оценки трения, альтернативную модели Боудена и Тэйбора, в которой учитывают влияние пути или времени трения на эволюцию коэффициента трения. Деформационная компонента коэффициента трения, по мнению авторов [3], ответственна главным образом за статическое трение, тогда как две других составляющих – за

динамическое и увеличиваются в процессе трения, однако пропорции между этими составляющими могут изменяться во времени.

Модель трения Tsukizoe и Ohmae для упрочненных волокнами полимерных композитов [4] базируется на предположении, что нормальная сила ( $P$ ) и сила трения ( $F$ ) распределены между волокнами ( $f$ ) и матричной фазой ( $m$ ).

Модель, предложенная Ахен [5] для многофазных композиционных материалов, предполагает наличие различных видов распределения нагрузки между фазами при трении по абразивсодержащему контртелу, при которой общая сила трения представляет собой сумму сил сопротивления трению от каждой фазы. Предполагается, что фазы сохраняют в процессе трения свои индивидуальные триботехнические свойства, контактная площадь трения каждой фазы не изменяется, и фазы не влияют на изменение специфических триботехнических свойств других фаз.

В работе [6] предложена модель для оценки коэффициента трения ( $\mu$ ) многокомпонентного композита, которая базируется на адгезионной модели трения Боудена и Тэйбора с учетом первого закона трения Амонтона.

Идея о зависимости коэффициента трения многокомпонентного композита от нагрузки, приходящейся на каждую фазу и коэффициентов трения каждой фазы принадлежит Schön [7].

В работе [8] предложена модель расчета коэффициентов трения многокомпонентных композиционных материалов, полученная из предположения, что хаотическое расположение компонентов композита обуславливает изотропные свойства материала, ориентированное расположение приводит к формированию соответствующей системы анизотропии коэффициентов трения многокомпонентного композита.

Таким образом, анализ современного состояния проблемы прогнозируемого формирования структуры и функциональных свойств многокомпонентных композиционных материалов показал, что в известных публикациях недостаточно освещены вопросы, связанные с влиянием компонентного состава и структуры на основные физико-механические, теплофизические и триботехнические свойства многокомпонентных композитов. Большинство теоретических моделей, описывающих триботехнические свойства многокомпонентных композитов, базируются на эмпирических подходах. Крайне недостаточно информации о влиянии компонентного состава композитов на их триботехнические свойства и о влиянии на них индивидуальным свойством компонентов.

#### Формулировка цели исследований

Целью работы была оценка адекватности разработанной математической модели прогнозирования коэффициентов трения композиционных материалов путем сравнительного анализа расчетных показателей и экспериментальных данных.

#### Изложение основного материала исследований

В работах [9-10] описана методика прогнозирования триботехнических характеристик (коэффициента трения и интенсивности износа) углерод-алюминиевых композиционных материалов. Предложенная математическая модель прогнозирования коэффициентов трения [9] базируется на определении статистических параметров микронапряжений и микродеформаций, полученных из решения статистической краевой задачи микромеханики процессов трения композиционных многофункциональных материалов с учетом нагрузки и индивидуальных характеристик (коэффициент трения, модуль Юнга) всех составляющих композита:

$$k_{mp} = \sum_{i=1}^N k_i P_i (E_i - E_M) / E_M. \quad (1)$$

где  $k_i$  - коэффициент трения компонента композита с номером  $i$ ;

$E_i, P_i$  - модули упругости и объемное содержание компонента с номером  $i$ , соответственно;

$N$  - число компонентов в композите;

$E_M$  - модуль упругости композита, определяемый согласно методике Т.Д. Шермергора [11], предполагаемой, что композиционный материал состоит из фаз, любая из которой изотропная, средний модуль упругости может определяться правилом механического смешивания:

$$\langle E_M \rangle = \sum_{i=1}^N P_i E_i. \quad (2)$$

Для оценки адекватности методики прогнозирования коэффициентов трения многокомпонентных композиционных материалов заданного состава и заданных условий эксплуатации было проведено сравнение расчетных данных и известных экспериментальных данных, приведенных в работах И.Н. Францевича, Д.М. Карпиноса, Л.Р. Вишнякова и др. [12], А.В. Ненахова и А.Г. Косторнова

[13], Ю.В. Найдича, А.Г. Косторнова и А.А. Адамовского и др. [14].

В качестве модельных материалов были приняты композиционные материалы трёх групп:

1 - композиты из титаномагниевого сплава с дисперсными включениями карбида циркония [12];

2 - композиты из пористой бронзы, пропитанной фторопластом [13];

3 - композит 05-ИТ системы хром-цирконий-сфалеритный нитрид бора [14].

Исходными данными для расчетов значений коэффициентов трения модельных композитов для различных условий эксплуатации являлись показатели индивидуальных характеристик компонентов (модуль упругости  $E$ , коэффициент Пуассона  $\mu$ , коэффициент трения  $k_{тр}$ ) и их компонентный состав, представленные в таблице 1.

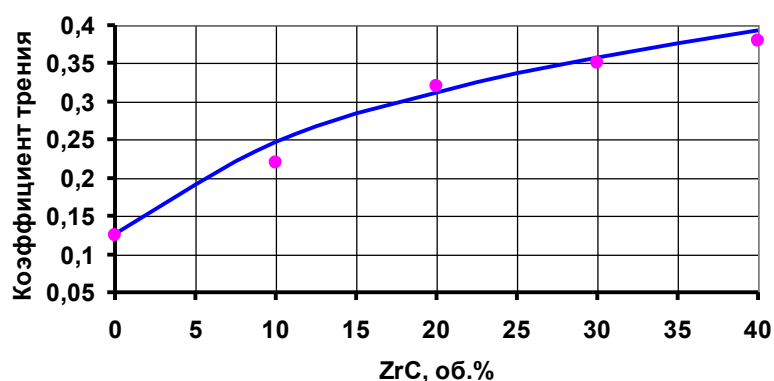
Результаты сравнительной оценки расчетных и экспериментальных данных коэффициентов трения трёх групп композиционных материалов представлены в таблице 2 и на рис. 1-3.

Видно, что для двухкомпонентного композита титаномагниевого сплава – карбид циркония отклонение расчётных и известных экспериментальных значений коэффициента трения не превышает 15 % (рис. 1).

Таблица 1

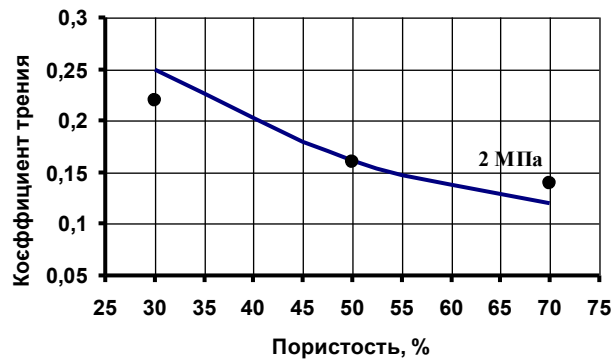
**Показатели индивидуальных характеристик компонентов композитов из титаномагниевого сплава с дисперсными включениями карбида циркония, пористой бронзы, пропитанной фторопластом и композита 05-ИТ [15]**

Группа композита	Материал	Модуль упругости, $E$ , ГПа	Коэффициент Пуассона, $\mu$	Коэффициент трения, $k_{тр}$
1.	Титаномагниевого сплава с дисперсными включениями карбида циркония:			
	- титаномагниевого сплава (Ti+6% Al);	120	0,32	0,15
	- карбида циркония (ZrC)	412	0,30	0,50
2.	Фтористая бронза, пропитанная фторопластом:			
	- бронза;	100	0,33	0,16
	- фторопласт (Ф4)	0,41	0,30	0,2
3.	Композит 05-ИТ:			
	- хром (2%Cr);	300	0,30	0,41
	- цирконий (0,5%Zr);	97	0,35	0,50
	- сфалеритный нитрид бора (97,5%BN <sub>сф</sub> )	1000	0,35	0,51 при V=1м/с 0,45 при V=3м/с 0,35 при V=6м/с

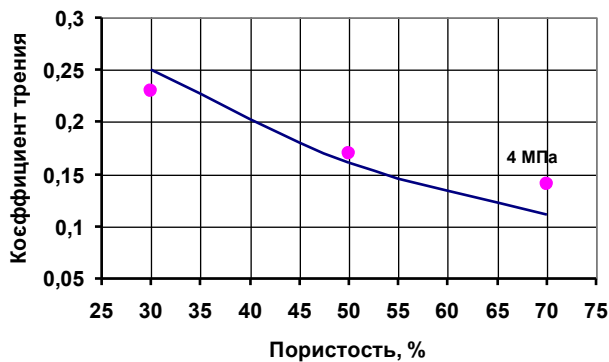


**Рис. 1. Влияние объёмной концентрации дисперсного включения (карбида циркония) на коэффициенты трения ( $P = 1$  МПа,  $V = 2$  м/сек.):**

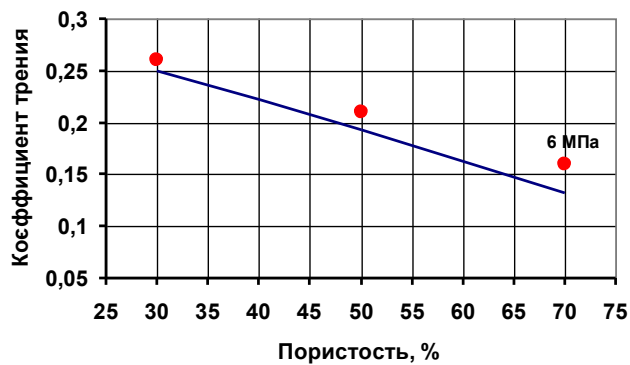
— - расчётные данные; ● - экспериментальные данные [12]



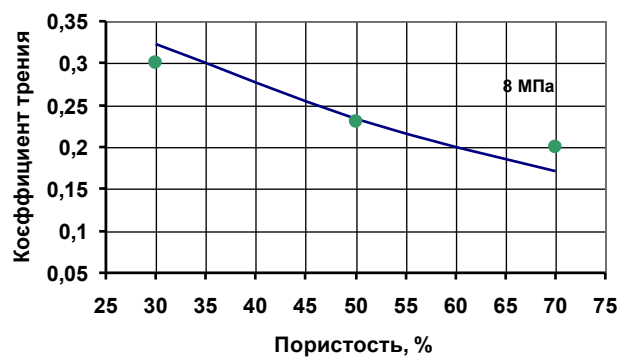
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Влияние исходной пористости образцов бронзы, пропитанных фторопластом, на коэффициент трия композитов:

— - расчётные данные; • - экспериментальные данные [13];  
 контактное давление: а – 2 МПа; б – 4 МПа; в – 6 МПа; г – 8 МПа

Таблиця 2

Оценка расчетных и экспериментальных данных коэффициента трения композитов				
Группа композита	Материал	Коэффициент трения, $k_{тр}$		
		расчётный	опытный	отклонение, %
1.	Титаномагнийевый сплав с дисперсными включениями карбида циркония	P=1 МПа		
		0,128	0,15	14,667
		0,247	0,22	12,273
		0,312	0,32	2,500
		0,358	0,35	2,286
2.	Фтористая бронза, пропитанная фторопластом	P=2 МПа		
		0,2498	0,22	13,546
		0,1611	0,16	0,688
		0,1200	0,14	14,286
		P=4 МПа		
		0,2499	0,23	8,652
		0,1613	0,17	5,118
		0,1110	0,14	20,714
		P=6 МПа		
		0,2499	0,26	3,885
		0,1930	0,21	8,095
		0,1323	0,16	17,3125
		P=8 МПа		
0,3230	0,30	7,667		
0,2450	0,23	6,522		
0,1715	0,20	14,250		
3.	Композит 05-ИТ	0,4990	0,525	4,953
		0,4390	0,405	8,395
		0,3400	0,340	0

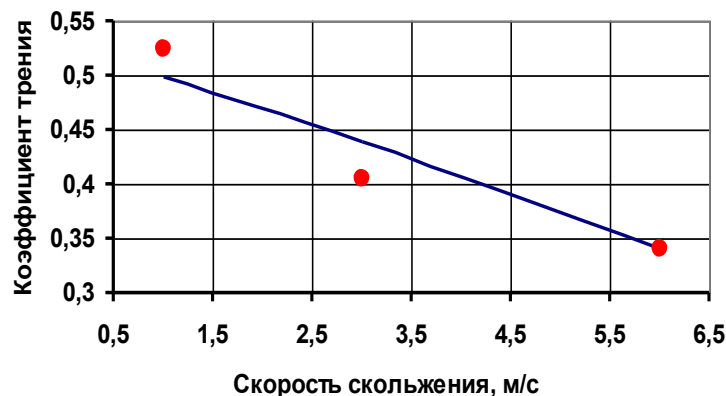


Рис. 3. Влияние скорости скольжения композита 05-ИТ на коэффициенты трения:  
 — - расчётные данные; • - экспериментальные данные [13]

Анализ расчетных и экспериментальных данных коэффициентов трения трёх групп рассматриваемых композиционных материалов показывает:

- для первой группы композита при давлении 1 МПа и скорости 2 м/сек. наблюдается незначительное расхождение расчётных и экспериментальных данных до 15% (рис. 1);

- для второй группы композита при уровне исходной пористости заготовки 30 % превышение расчётных значений коэффициента трения над экспериментальными составляет не более 13%, а при пористости 70 % экспериментальные значения коэффициентов трения выше расчётных на 21 %, что

можно объяснить неполным заполнением фторопластом пор у высокопористых заготовок, не учитываемое в расчетной модели (рис. 2);

- для третьей группы композита степень отклонения расчетных и экспериментальных данных не превышает 10 % (рис. 3).

#### Выводы

Представленные результаты сравнительной оценки расчетных и известных экспериментальных данных показывают, что разработанная математическая модель прогнозирования коэффициентов трения адекватна, что позволяет по исходным (табличным) данным компонентов композита (модуля упругости, коэффициента Пуассона, коэффициента трения) формировать новую структуру композита, обеспечивающую требуемые триботехнические характеристики.

#### Список использованной литературы

1. Композиционные материалы: справочник; под ред. В.В. Васильева. - М.: Машиностроение, 1990.- 456 с.
2. Bowden F. P. The area of contact between stationary and between moving surfaces / F. P. Bowden, D. Tabor. Proc. of the Royal Soc. Lond. A 169 (938), 391-413 (1939) (Cited on page 6).
3. Suh N. P. The genesis of friction / N. P. Suh, H.-C. Sin. Wear 69, 91-111 (1981).
4. Tsukizoe T. Friction and wear of advanced composite materials / T. Tsukizoe, N. Ohmae // Fibre Science and Technology 18, 265-286 (1983) (Cited on pages 23, 64, 74, 117 and 183).
5. Axen N. A model for friction of multiphase materials in abrasion / N. Axen, I.M. Hutchings, S. Jacobson // Tribology International 29, 6, 467-475 (1996) (Cited on pages 75, 76 and 179.)
6. Smerdova O. Interfacial and bulk friction-induced dissipation in composites / Smerdova O. – Lyon : Université de Lyon, 2012. –184 p.
7. Schon J. Coefficient of friction of composite delamination surfaces / Schon J. Wear 237, 77-89 (2000) (Cited on page 88).
8. Дедков Г.В. Нанотрибология: экспериментальные факты и теоретические модели / Г. В. Дедков // Успехи физических наук. - 2000, (170), 6. - С. 586 - 618.
9. Працездатність вуглець-алюмінієвих композиційних матеріалів за умов тертя / В. О. Скачков, С. А. Воденніков, В. І. Іванов, О. С. Воденнікова // Металлургия : сб. науч. тр. – Запорожье : ЗГИА. – 2012. – Вып.1 (26). - С. 105 - 109.
10. Скачков В. А. Анализ точности моделей прогнозирования триботехнических характеристик композитов / В. А. Скачков, Г. А. Баглюк, О. С. Воденникова [и др.] // Восточно- европейский журнал передовых технологий. - 2012. - № 3/5 (57). - С. 13 - 15.
11. Шермергор Т. Д. Теория упругости микронеоднородных сред /Т. Д. Шермергор. - М.: Наука, 1977. – 399 с.
12. Францевич И. Н. Антифрикционные композиции на основе спечённого титана / 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 (181). – С.61-65.
13. Ненахов А. В. Триботехнические характеристики материалов на основе бронзы для малогабаритных узлов трения / А. В. Ненахов, А. Г. Косторнов // Порошковая металлургия. – 2003.- №7/8. – С.60-64.
14. Найдич Ю. В. Триботехнические свойства сверхтвёрдых материалов на основе нитрида бора в контакте с твёрдыми сплавами / Ю. В. Найдич, А. Г. Косторнов, А. А. Адамовский, В. Т. Варченко, А. Д. Костенко// Порошковая металлургия. – 2011.- №5/6. – С.105-112.
15. Лившиц Б. Г. Физические свойства металлов и сплавов: [учебн. для металлург. спец. вузов] / Б. Г. Лившиц, В. С. Краношин, Я. Л. Линецкий; под ред. Б. Г. Лившица. – [2-е изд. доп. и перераб.]. - М., 1980. – 320 с.