

THE INTERNATIONAL  
SCIENTIFIC  
JOURNAL

ISSN 2079-1372



# *Problems of Tribology*

# *Проблеми трибології*

МІЖНАРОДНИЙ  
НАУКОВИЙ  
ЖУРНАЛ

---

2. 2017

THE INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL

# ***PROBLEMS OF TRIBOLOGY***

International Federation for Theory of  
Mechanics and Mechanisms (IFTOMM)  
National Committee of Ukraine  
for the Mechanics of Machines and Mechanisms

Khmel'nitsky National University  
The Ministry of Education and Science of Ukraine

---

---

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

# ***ПРОБЛЕМИ ТРИБОЛОГІЇ***

Міжнародна федерація з теорії машин та механізмів  
Національний комітет України з машинознавства

Хмельницький національний університет  
Міністерство освіти і науки України

---

---

---

2-2017

# ПРОБЛЕМИ ТРИБОЛОГІЇ

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Видається з серпня 1996 р.

Виходить 4 рази на рік

Хмельницький • ХНУ • 2017, № 2 (84)

Засновник:

Хмельницький національний університет

Головний редактор: О.В. Диха

Заступник головного редактора: Р.В. Сорокатий

Редакційна колегія:

В. В. Аулін (Україна, Кіровоград),  
П. Блау (США, Оук-Ридж),  
В.А. Войтов (Україна, Харків),  
С.С. Венцель (Україна, Харків)  
Я.М. Гладкий (Україна, Хмельницький),  
В.І. Дворук (Україна, Київ),  
М. Дзимко (Словакія, Жиліна)  
М.Ф. Дмитриченко (Україна, Київ),  
Л. Добжанський (Польща, Глівіце),  
Я.М. Дрогомирецький (Україна, Івано-Франківськ)  
В. Д. Євдокімов (Україна, Одеса),  
В.Г. Каплун (Україна, Хмельницький),  
Г.С. Калда (Україна, Хмельницький),  
М.В. Кіндрачук (Україна, Київ),  
Л.П. Кліменко (Україна, Миколаїв),  
С.Г. Костогрив (Україна, Хмельницький),  
К. Ленік (Польща, Люблін),

С. Питко (Польща, Краків),  
М.П. Мазур (Україна, Хмельницький),  
Р.Г. Мнацаканов (Україна, Київ),  
Я. Мушял (Польща, Бідгошч),  
В.П. Олександренко (Україна, Хмельницький),  
М. Опеляк (Польща, Люблін),  
М.І. Пашечко (Україна, Львів),  
В. Б. Рудницький (Україна, Хмельницький),  
М.Ф. Семенюк (Україна, Хмельницький),  
А. Сігал (США, Ванкувер),  
Т.С. Скобло (Україна, Харків),  
Л.А. Сосновський (Білорусь, Гомель),  
М.С. Стечишин (Україна, Хмельницький),  
М.Я. Хлопенко (Україна, Миколаїв),  
М.В. Чернець (Україна, Дрогобич),  
М.І. Черновол (Україна, Кіровоград),  
В.В. Шевеля (Україна, Хмельницький)

Відповідальний секретар: О.П. ДИТИНЮК

Адреса редакції:

Україна, 29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська 11, к. 4-401  
Хмельницький національний університет,  
редакція журналу "Проблеми трибології"  
тел. +380975546925, E-mail: tribosenator@gmail.com

Internet: <http://tribology.khnu.km.ua>

Зареєстровано Міністерством юстиції України

Свідоцтво про держреєстрацію друкованого ЗМІ: Серія КВ № 1917 від 14 березня 1996 року

Журнал «Проблеми трибології» входить до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 29.09.2014 № 1081)

Журнал «Проблеми трибології (Problems of Tribology)» включений до міжнародних наукометричних баз: РІНЦ (Російський Індекс Наукового Цитування) згідно ліцензійної угоди №212-04 від 22.04.13 р. Google Scholar, Index Copernicus

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради ХНУ, протокол № 11 від 27.04.2017 р.

© Хмельницький національний університет, 2017

© Редакція журналу "Проблеми трибології (Problems of Tribology)", 2017

# PROBLEMS OF TRIBOLOGY

INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL

*Published since August 1996, four time a year*

---

**Khmel'nitskiy ▪ KNU ▪ 2017, № 2 (84)**

---

**Establisher:**

**Khmel'nitskiy national university**

**Editor-in-Chief: A.V. Dykha**

**Deputy Editor-in-Chief: R.V. Sorokatyi**

**Editorial advizory boards:**

V.V. Aulin (Ukraine, Kirovograd),  
P.J. Blau (USA, Oak Ridge),  
V.A. Voitov (Ukraine, Kharkiv),  
E.S. Ventsel (Ukraine, Kharkiv),  
Y.M. Gladkiy (Ukraine, Khmel'nitskiy),  
V.I. Dvoruk (Ukraine, Kiev),  
M. Dzimko (Slovakia, Zilina),  
M.F. Dmitrichenko (Ukraine, Kiev),  
L. A. Dobzhansky (Poland, Gliwice),  
Y.M. Drogomiretskiy (Ukraine, Ivano-Frankivsk),  
V. D. Evdokimov (Ukraine, Odessa),  
V.G. Kaplun (Ukraine, Khmel'nitskiy),  
G.S. Kalda (Ukraine, Khmel'nitskiy),  
M.V. Kindrachuk (Ukraine, Kiev),  
L.P. Klimenko (Ukraine, Mykolaiv),  
S.G. Kostogryz (Ukraine, Khmel'nitskiy),  
K. Lenik (Poland, Lublin),

S. Pytko (Poland, Krakow),  
M.P. Mazur (Ukraine, Khmel'nitskiy),  
R.G. Mnatsakanov (Ukraine, Kiev),  
J. Musial (Poland, Bydgoszcz),  
V.P. Oleksandrenko (Ukraine, Khmel'nitskiy),  
M. Opielak (Poland, Lublin),  
M.I. Pashechko (Ukraine, Lviv),  
V. B. Rudnitskiy (Ukraine, Khmel'nitskiy),  
M.F. Semeniuk (Ukraine, Khmel'nitskiy),  
A. Segall (USA, Vancouver),  
T.S. Skoblo (Ukraine, Kharkiv),  
L.A. Sosnovskiy (Belarus, Gornel),  
M.S. Stechishin (Ukraine, Khmel'nitskiy),  
M.Y. Khlopenko (Ukraine, Mykolaiv),  
M.V. Chernets (Ukraine, Drogobych),  
M.I. Chernovol (Ukraine, Kirovograd),  
V.V. Shevelya (Ukraine, Khmel'nitskiy).

**Executive secretary: O.P. DYTNUK**

**Editorial board address:**

International scientific journal "Problems of Tribology",  
Khmel'nitskiy National University,  
Institut'skaia str. 11, Khmel'nitskiy, 29016, Ukraine  
phone +380975546925

**E-mail: tribosenator@gmail.com**

**Internet: <http://tribology.khnu.km.ua>**

**ЗМІСТ**

<b>Шевеля В.В., Купец Б., Калда Г.С., Соколан Ю.С.</b> Изменение триболого-реологических свойств стали при повторно-циклическом трении с учетом эффекта баушингера.....	6
<b>Каплун П.В., Гончар В.А., Тютюник Б.І., Матвійшин П.В.</b> Дослідження зносостійкості сталей в корозійно - абразивному середовищі після зміцнення поверхні іонним азотуванням.....	16
<b>Рудницький В.Б., Ярецька Н.О., Венгер В.О.</b> Застосування ІТ технологій в механіці деформованого твердого тіла.....	22
<b>Анищенко А.С., Кухарь В.В., Присяжный А.Г.</b> Сравнительный анализ критериев достоверности экспериментального исследования силовых режимов деформации титановых сплавов.....	31
<b>Криштопа С.І.</b> Вплив на фрикційні характеристики гальмівних пристроїв технологічного транспорту трибоелектричних явищ.....	37
<b>Гордієнко О.А., Тітов Т.С., Ранський А.П., Диха О.В.</b> Дослідження трибохімічної системи «бронза БрАЖ 9-4 - органічний додаток - олива І-20А - сталь 45».....	43
<b>Стечишин М.С., Олександренко В.П., Лук'янюк М.В., Люховець В.В., Лук'янюк М.М.</b> Технологія азотування в тліочому розряді сталей різального комплексу м'ясоподрібнювальних машин.....	50
<b>Каразей В.Д., Соколан К.С., Решетник П.П.</b> Дослідження процесу штампування заготовки деталі «муфта» із використанням програми DEFORM.....	56
<b>Костогриз С.Г., Мисліборський В.В.</b> Автоколивання у фрикційному контакті (наближений розрахунок).....	62
<b>Марченко Д.Д.</b> Экспериментальные исследования эффективности влияния технологии обкатывания стальных деталей на контактную прочность.....	69
<b>Буряк В.Г., Буряк А.В.</b> Закономірності зміни розмірів контактних поверхонь і усадки стружки та енергетичного стану обробного і інструментального матеріалів в процесі оброблення різанням.....	79
<b>Диха О.В., Вичавка А.А., Дитинюк В.О.</b> Визначення зносу та технологія обробки мастильних канавок круглого профілю.....	86

<b>Вимоги до публікацій.....</b>	<b>93</b>
----------------------------------	-----------

---

CONTENTS

<b>Shevelya V.V., Kupiec B., Kalda G.S., Sokolan J.S.</b> Changing of tribological and rheological properties in the process of repeatedly-cycling friction considering baushinger's effect...	6
<b>Kaplun P.V., Honchar V.A., Tiutiunyk B.I., Matviishyn P.V.</b> Investigation of the durability of steels in corrosive-abrasive environments after hardening by ionic nitriding.....	16
<b>Rudnickij V.B., Yarets'ka N.O., Venger V.O.</b> The use of IT technologies in the mechanics of deformable bodies.....	22
<b>Anishchenko O.S., Kukhar V.V., Prysiashnyi A.G.</b> Comparative analysis of reliability criteria for the experimental research of the force modes of deformation of titanium alloys.....	31
<b>Kryshchyn S.I.</b> Influence of triboelectric processes on friction characteristics of braking devices of technological transport.....	37
<b>Gordienko O.A., Titov T.S., Ranskiy A.P., Dykha O.V.</b> Research of the tribochemical system «bronze - organic additive - oil I-20A - steel».....	43
<b>Stechyshyn M.S., Oleksandrenko V.P., Lukianiuk M.V., Liukhovets V.V., Lukianiuk M.M.</b> Technology of nitriding in a glow discharge of steels for cutting set of shredding meat machines.....	50
<b>Karazey V.D., Sokolan K.S., Reshetnik P.P.</b> Research of the stamping process of "coupling" component billet using DEFORM program.....	56
<b>Kostogris S.G., Misliborski V.V.</b> Self-oscillations in frictional contact (approximate calculation).....	62
<b>Marchenko D.D.</b> Experimental studies of the effectiveness of the influence of the technology of lining the steel parts on contact strength.....	69
<b>Buryak V.G., Buryak A.V.</b> The patterns of change in size of the contact surfaces and shrinkage of shavings and the energy States processed and tool materials during machining.....	79
<b>Dykha O.V., Vychavka A.A., Dytynyuk V.O.</b> Definition of wear and the technology of processing oil grooves round profil.....	86

<b>Rules of the publication .....</b>	<b>93</b>
---------------------------------------	-----------

**Гордієнко О.А.,\***  
**Тітов Т.С.,\***  
**Ранський А.П.,\***  
**Диха О.В.\*\***

\* Вінницький національний технічний університет,  
 м. Вінниця, Україна,

\*\* Хмельницький національний університет,  
 м. Хмельницький, Україна

E-mail: tarastitov88@gmail.com

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОХІМІЧНОЇ СИСТЕМИ «БРОНЗА БрАЖ 9-4 - ОРГАНІЧНИЙ ДОДАТОК - ОЛИВА І-20А - СТАЛЬ 45»

УДК 541.49 + 546.562

В роботі досліджена трибохімічна система «бронза БрАЖ 9-4 - органічний додток - олива І-20А - сталь 45» на предмет утворення координаційних сполук купруму(II) під дією механічного активування металевих поверхонь пари тертя та органічних додатків. Встановлено, що краці протизношувальні та антифрикційні властивості відповідають мастильним композиціям, до складу яких входять органічні додтки з високими значеннями електронодонорної активності ( $DN_{SbCl_2}$ ). При цьому суттєве покращення триботехнічних характеристик мастильних композицій, до складу яких входять органічні додтки, порівняно з «чистою» оливою І-20А, залежить як від електронодонорної ( $DN_{SbCl_2}$ ), так і від адсорбційної ( $I_a$ ) активності досліджених органічних додатків.

**Ключові слова:** органічні додтки, трибохімічна система, координаційні сполуки купруму(II), електронодонорна активність, адсорбційна активність.

### Вступ

В сучасній трибохімії мастильні матеріали розглядають як складову (конструкційний елемент) вузла тертя, що значною мірою визначає довговічність та надійність машин та механізмів [1]. Крім того, сучасний розвиток машин та механізмів характеризується підвищеними вимогами до умов їх експлуатації: навантажувальними, протизношувальними, протизадирними, антиокислювальними властивостями, густиною та стійкістю до корозії [2]. Чисті оливи та мастила не в змозі забезпечити повний перелік висунутих часом вимог. Між тим, додавання до базових олив органічних речовин (додтків) в значній мірі вирішує цю комплексну проблему. В зв'язку з вище зазначеним нами були досліджені органічні додтки до індустріальної оливи І-20А, які суттєво покращують їх протизношувальні та антифрикційні властивості.

### Постановка задачі

Раніше [1] були проведені ґрунтовні дослідження триботехнічних властивостей ( $I_g, f_{mp}$ ) мастильних композицій на основі індустріальних олив та органічних додатків із класу тіоамідів та їх метал-хелатів. В рамках фундаментальної залежності «структура – властивості» вперше було проведено аналіз залежності експлуатаційних характеристик мастильних композицій від складу та будови тіоамідів та координаційних сполук купруму(II) на їх основі [3]. Так, було встановлено, що структурні особливості досліджених додатків суттєво впливають на ефективність роботи вузлів тертя в режимі вибіркового перенесення [4]. В продовження цих робіт нами досліджено утворення координаційних сполук купруму(II) при активації металевих поверхонь пари тертя «бронза БрАЖ 9-4 - сталь 45» в присутності розширеного кола органічних додатків, які суттєво покращують протизношувальні та антифрикційні властивості мастильних композицій.

### Мета роботи

Встановлення розчинення металеві міді в трибохімічній системі «бронза БрАЖ 9-4 - органічний додток - олива І-20А - сталь 45», утворення під дією органічних додатків та механічних напружень координаційних сполук купруму(II), які суттєво покращують триботехнічні властивості мастильного серволища.

### Експериментальна частина

Органічні речовини (додтки): дипропіловий естер шавлевої кислоти, етилацетат, тетрахлорметан (ТХМ), диметилформамід (ДМФА), диметилсульфоксид (ДМСО) використовували марки «ч» або очищали методами, що наведені в роботі [5].

*Приготування мастильних композицій.* Приготування мастильних композицій 1 - 5 (табл. 2). До 97 - 98,5 мл індустріальної оливи І-20А при нагріванні до 70 - 90 °С додавали 1,5 - 3,0 мл органічного до-

датку та переміщували до утворення гомогенного розчину. Отримані мастильні композиції охолоджували та проводили триботехнічні дослідження.

**Методика дослідження.** Мастильні композиції досліджувалися на машині тертя СМЦ-2 з парами тертя «колодка-ролик» з швидкістю ковзання 3,0 м/с, шляхом тертя  $3 \cdot 10^3$  м. Матеріал ролика – сталь 45, колодки – бронза БрАЖ 9-4. Початкова шорсткість 0,30–0,62 мкм для сталевого зразка і 0,62–0,80 мкм для бронзового. Тривалість випробування однієї композиції – 40 хв. Зміну температури в зоні тертя визначали хромель-копелевою термопарою та рестрували на відповідній кривій стрічкової діаграми електронного потенціометра КСП-4. Силу тертя визначали за допомогою тензобалки. Зношування зразка рестрували ваговим методом на аналітичних вагах 2 кл. точності типу ВЛР-200, ГОСТ 24104-80. Величину зміни маси зразків визначали за формулою:

$$\Delta m = m_n - m_k, \quad (1)$$

де  $m_n$  – початкова маса зразка, г;

$m_k$  – маса зразка в кінці досліду, г.

З кривої моменту тертя на діаграмній стрічці знімали значення  $l$  в мм, що відповідають відхиленню рухомої каретки потенціометра КСП-4 на початку та в кінці досліду (режим сталого вибіркового перенесення в парі тертя). За допомогою графіка тарування визначали відповідні моменти тертя  $M_{mp}$  за величиною відхилення  $l$  (мм) каретки потенціометра. Коефіцієнт тертя визначали за формулою:

$$f = \frac{M_{mp}}{r \cdot N}, \quad (2)$$

де  $M_{mp}$  – момент тертя в парі, що досліджується, Н·м;

$r$  – радіус рухомого ролика, м;

$N$  – загальне навантаження в парі тертя, Н.

Перед проведенням триботехнічних досліджень було здійснено тарування пружини (табл. 1) залежно від її стиснення до навантаження, яке ця пружина створює.

Таблиця 1

## Тарування пружини

Навантаження, Н	Стиснення пружини, мм	Висота пружини, мм
0	0	60
98,07	2	58
196,14	6	54
294,2	13	47
392,27	19	41
784,53	21	39

Принципова схема установки дослідження триботехнічних характеристик мастильних композицій пари тертя «бронза - сталь» наведена на рис. 1.

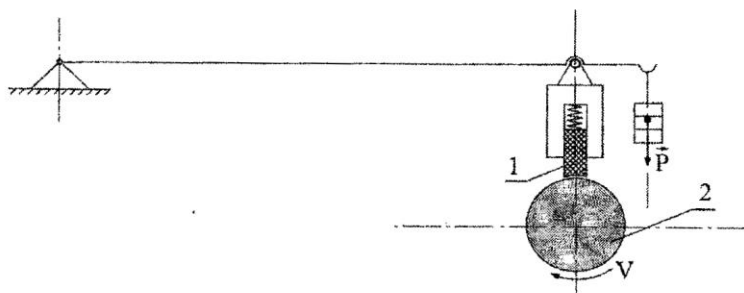


Рис. 1 – Принципова схема установки з дослідження триботехнічних характеристик пари тертя «бронза БрАЖ 9-4 – сталь 45» на машині тертя типу СМЦ-2:  
1 – бронзова колодка (БрАЖ 9-4);  
2 – сталевий ролик (сталь 45)



## Обговорення експериментальних даних

*Розчинення металів під дією апротонних розчинників в парі тертя «бронза – сталь».*

Питання розчинення (окиснення) металів в апротонних розчинниках в науковій літературі присвячена значна кількість робіт [6]. Так, в роботах [7, 8] неодноразово відзначалось, що окислювальна розчинність металів, тобто прямий синтез металоорганічних і координаційних сполук, визначається як природою металу (потенціалом іонізації  $U$ , стандартним окисно-відновним потенціалом  $\varphi^0$ , резонансним потенціалом  $I_r$ ), так і природою органічного апротонного розчинника (дипольним моментом  $\mu$ , діелектричною проникністю  $\epsilon^{20}$ , донорним числом ( $DN_{SbCl_5}$ ). В роботах [9 - 11] констатується, що швидкість окиснення металів  $W$  залежить від донорних чисел  $DN_{SbCl_5}$  органічних розчинників і має екстремальний характер, тобто має місце залежність  $W = f(DN_{SbCl_5})$ . Це можна пояснити їх вибірковою адсорбцією на металевих поверхнях різної природи. Так, В. П. Купріним [12, 13] була встановлена залежність адсорбції органічних речовин (розчинників) на міді та бронзі від їх резонансного потенціалу ( $I_r$ ), яка також має подібний екстремальний характер. Тобто, можна констатувати, що між донорною силою органічних розчинників ( $DN_{SbCl_5}$ ) і їх резонансними потенціалами ( $I_r$ ) існує прямий зв'язок, коли адсорбція органічних речовин (розчинників) на металевій поверхні, окиснення металів цієї поверхні з утворенням катіонів  $M^{n+}$  і вірогідність їх комплексоутворення в розчині є максимальною (потрійний умовний «резонанс») і, внаслідок цього, пара тертя має мінімальні значення зношування ( $I_g$ ) та коефіцієнту тертя ( $f_{mp}$ ) у випадку використання таких трибохімічних систем.

В зв'язку з вище зазначеним, нами була досліджена трибохімічна система «бронза БрАЖ 9-4 - органічний додаток - олива І-20А - сталь 45» на предмет утворення координаційних сполук купруму(II) під дією механічного активування металевих поверхонь пари тертя та органічних додатків. Останні склали ряд сполук (табл. 2), які раніше використовувались нами виключно як органічні розчинники для переведення малорозчинних метал-хелатів купруму(II) з тіоамідами різного заміщення в гомогенний розчин сливи так, наприклад, використання дипропілового естеру шавлевої кислоти [14]. Однак, в даній роботі органічні добавки (розчинники) були досліджені нами в першу чергу як хімічно активні складові, що сприяють утворенню координаційних сполук купруму(II) та суттєвому покращенню триботехнічних характеристик досліджених мастильних композицій.

Таблиця 2

**Склад мастильних композицій «олива І-20А + органічний розчинник»,  
їх фізичні, протизношувальні та антифрикційні властивості**

Композиція	Склад композиції			Фізичні властивості [22]			Триботехнічні властивості	
	органічний розчинник		базова олива І-20А	$\mu$ , КгМ $\times 10^{-30}$	$\epsilon^{20}$	$DN_{SbCl_5}$ , кДж/моль	$I_g$ , мг	$f_{mp}$
	назва	% мас.						
1	дипропіловий естер шавлевої кислоти	3,0	до 100	-	-	60,00	0,5106	0,32
2	етилацетат	3,0	до 100	6,03	18,51	71,57	0,3215	0,23
3	ТХМ	1,5	до 100	-	-	84,00	0,2128	0,19
	ДМФА	1,5						
4	ДМФА	3,0	до 100	12,70	36,7	111,33	0,0928	0,12
5	ДМСО	3,0	до 100	13,03	48,9	124,73	0,0733	0,10
6	І-20А	100	-	-	-	-	0,6004	0,42

*Примітка.* Дослідження триботехнічних властивостей мастильних композицій 1–5 проводили при контактному навантаженні 8,0 МПа в парі тертя «бронза БрАЖ 9-4 – сталь 45» за температури 25 °С протягом 3 годин.

Наведені в табл. 2 дані показують, що кращі експлуатаційні характеристики ( $I_g$ ,  $f_{mp}$ ) мають мастильні композиції, до складу яких входили органічні добавки з високими значеннями електронодонорної активності ( $DN_{SbCl_5}$ ). Так, додавання до ДМФА ( $DN_{SbCl_5} = 111,3$  кДж/моль, комп. 4) такої ж кількості тетрахлорметану ( $DN_{SbCl_5} = 0,0$  кДж/моль, комп. 3) приводить до зменшення загального значення  $DN_{SbCl_5}$  системи та до суттєвого погіршення триботехнічних характеристик  $I_g$  та  $f_{mp}$ , відповідно, в 2,3

та 1,6 рази. Слід відмітити, що додаткове розбавлення ДМФА на 50 % тетрахлорметаном ( $DN_{SbCl_5} = 0$  кДж/моль) знижує загальне значення донорної активності ( $DN_{SbCl_5} = 84,4$  кДж/моль) та збільшує зношування в 1,6 рази порівняно з «чистим» ДМФА, що ще раз підтверджує важливу роль апротонних розчинників та їх донорну активність при розчиненні (окисненні) металів. Тобто, швидкість окиснення металеві міді, яка входить до складу бронзи БрАЖ 9-4, визначається як електродонорною активністю органічних додатків  $W = f(DN_{SbCl_5})$ , так і їх вибірковою адсорбцією (резонансними потенціалами) на бронзовій поверхні  $W = f(I_r)$  [12, 13, 15].

*Дослідження протизношувальних та антифрикційних властивостей пари тертя «бронза – сталь» в присутності органічних додатків.*

Відомо [6, 14], що в парі тертя «бронза – сталь» механічний вплив тертя приводить не лише до зношування її поверхонь, а і за наявності в мастильному середовищі комплексоутворюючих реагентів – до утворення різних за складом та своєю будовою металокомплексних сполук. Вперше це явище було зафіксовано в парі тертя «мідний сплав – сталь» в гліцерині, де останній, окиснюючись, як ліганд, утворював складні металокомплексні сполуки [16 - 18]. Наступними наполегливими дослідженнями цієї пари тертя в присутності N-, O-вмісних органічних лігандів було підтверджено утворення координаційних сполук купруму(II), наявність яких суттєво покращувала триботехнічні властивості мастильних композицій [6, 19, 20]. Тобто зменшення зношування ( $I_g$ ) та коефіцієнту тертя ( $f_{mp}$ ) однозначно пов'язували з окисненням металів пари тертя в мастильному середовищі та утворенням їх координаційних сполук [21].

Отримані нами результати досліджень протизношувальних і антифрикційних властивостей мастильних композицій 1 - 5 (табл. 2) в широкому діапазоні контактних навантажень наведено, відповідно, в табл. 3, 4 і подані графічно на рис. 2. Дані, що наведені на рис. 2, а свідчать про те, що в діапазоні контактних навантажень 4 - 24 МПа мастильні композиції, до складу яких входять органічні розчинники з високими значеннями донорних чисел  $DN_{SbCl_5}$  (композиції 4, 5), мають в парі тертя «бронза БрАЖ 9-4 - сталь 45» найкращі протизношувальні властивості, що однозначно вказує на вирішальну роль донорної активності органічних апротонних розчинників при окисненні міді в складі бронзи. Визначальний вплив донорної активності органічних розчинників в складі мастильних композицій на зменшення зношування залишається без змін незалежно від контактного навантаження (4 - 24 МПа) в дослідженій парі тертя.

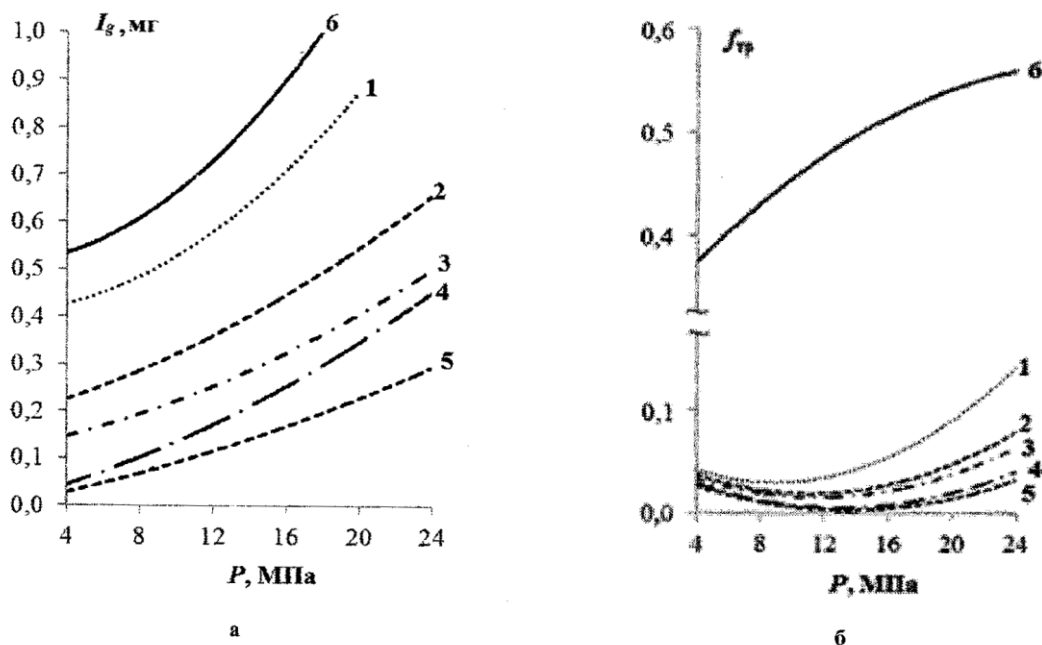


Рис. 2 – Залежність зношування (а) та коефіцієнту тертя (б) від контактного навантаження в парі тертя «бронза БрАЖ 9-4 - сталь 45» з мастильною композицією

«олива І-20А + органічний розчинник» ( $t = 25$  °С,  $\tau = 3,00$  год):

1 – дипропіловий естер шавлевої кислоти;

2 – етилацетат;

3 – ТХМ : ДМФА = 1 : 1;

4 – ДМФА;

5 – ДМСО;

6 – «чиста» олива І-20А

Встановлена також подібна залежність зменшення коефіцієнту тертя від збільшення донорної активності органічних апротонних розчинників в діапазоні навантажень 4 - 24 МПа для досліджених мастильних композицій (рис. 2, б). Слід відмітити суттєво менший діапазон зміни значень коефіцієнту тертя в означеному діапазоні контактних навантажень. Очевидно, що це пов'язано з іншим механізмом антифрикційної дії складових композицій 1 - 5 порівняно з механізмом протизношувальної дії цих же розчинників.

Таблиця 3

**Протизношувальні властивості мастильних композицій  
«олива I-20A + органічний розчинник»  
при різних контактних навантаженнях**

Композиція	Зношування зразка $I_g$ , мг, при контактному тиску $P_k$ , МПа					
	4	8	12	16	20	24
1	0,4134	0,5106	0,5747	0,6933	0,8892	-
2	0,2200	0,2856	0,3805	0,4301	0,5408	0,6647
3	0,1402	0,2008	0,2567	0,3200	0,4001	0,5066
4	0,0433	0,0928	0,1867	0,2534	0,3332	0,4607
5	0,0267	0,0733	0,1005	0,1800	0,2267	0,2940
6	0,6003	0,6004	0,7406	0,9002	-	-

Таблиця 4

**Антифрикційні властивості мастильних композицій  
«олива I-20A + органічний розчинник»  
при різних контактних навантаженнях**

Композиція	Коефіцієнт тертя $f_{mp}$ при контактному тиску $P_k$ , МПа					
	4	8	12	16	20	24
1	0,41	0,32	0,33	0,51	0,96	1,41
2	0,37	0,23	0,19	0,27	0,48	0,80
3	0,34	0,19	0,15	0,21	0,40	0,63
4	0,29	0,12	0,06	0,08	0,19	0,41
5	0,27	0,10	0,03	0,05	0,15	0,32
6	0,38	0,42	0,49	0,52	0,52	0,56

Таким чином, підсумовуючи вище наведене, можна зробити наступні узагальнення:

- органічні добавки, як потенційні комплексопи, приймають активну участь в формуванні граничного поверхневого шару пари тертя «бронза - сталь» та впливають на її триботехнічні властивості;
- суттєве покращення триботехнічних властивостей ( $I_g$ ,  $f_{mp}$ ) пари тертя «бронза - сталь» на базі індустриальних олив визначається утворенням координаційних сполук купруму (II) з потенційними комплексопи або їх модифікованими (видозміненими) хімічними формами;
- активування металевих поверхонь пари тертя «бронза - сталь» при граничних навантаженнях  $P_k = 8 - 16$  МПа відповідає мінімальним значенням  $I_g$  та  $f_{mp}$  та оптимальним умовам утворення відповідних хелатів купруму(II) в середовищі індустриальних олив.

### Висновки

1. В трибохімічній системі «бронза БрАЖ 9-4 - органічний додаток - олива I-20A - сталь 45» досліджено вплив органічних додатків на триботехнічні характеристики мастильних композицій. Встановлено, що кращі протизношувальні та антифрикційні властивості відповідають мастильним композиціям, до складу яких входять органічні добавки з високими значеннями електронодонорної активності ( $DN_{SbCl_5}$ ).

2. Суттєве покращення триботехнічних характеристик мастильних композицій, до складу яких входять органічні добавки, порівняно з «чистою» оливою I-20A, залежить як від електронодонорної ( $DN_{SbCl_5}$ ), так і від адсорбційної ( $I_s$ ) активності досліджених органічних додатків.

## Список літератури

1. Композиційні мастильні матеріали на основі тіоамідів та їх комплексних сполук. Синтез. Дослідження. Використання / [А. П. Ранський, С. В. Бойченко, О. А. Гордієнко та ін.]. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 328 с.
2. Ранський А. П. Дослідження присадних матеріалів на основі тригалогенпохідних карбонових кислот в оливі И-40 / А. П. Ранський, О. А. Гордієнко // Проблеми трибології. – 2012. – № 1. – С. 55–61.
3. Ранський Анатолій Петрович. Координаційні сполуки деяких 3d-металів з ароматичними та гетероциклічними тіоамідами : дис. ... докт. хім. наук : 02.00.01 / Ранський Анатолій Петрович. – Дніпропетровськ, 2003. – 327 с.
4. Механізм вибіркового перенесення з точки зору резонансного потенціалу за Нечасвим [електронний ресурс] / [А. П. Ранський, Н. О. Діденко, Т. С. Тітов, І. І. Безвозюк] // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2010. – № 4. – 4 с. Режим доступу до ел. ресурсу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/230/228>.
5. Юрьев Ю. К. Практические работы по органической химии. Издание 2-е, доп. / Ю. К. Юрьев. – М. : Из-во Московского университета, 1961. – Вып. 1 и 2. – 420 с.
6. Прямой синтез координационных соединений / [В. В. Скопенко, А. Д. Гарновский, В. Н. Козодей и др.]. – К. : Вентури, 1997. – 172 с.
7. Гарновский А. Д. Прямой синтез координационных соединений из металлов в неводных средах / А. Д. Гарновский, Ю. И. Рябухин, А. С. Кужаров // Координационная химия. – 1984. – Т. 10, № 8. – С. 1011–1033.
8. Масленников Станислав Владимирович. Окисление металлов органическими соединениями в апротонных растворителях : дис. ... докт. хім. наук : 02.00.08, 02.00.04 / Масленников Станислав Владимирович. – Нижний Новгород, 2005. – 201 с.
9. Роль растворителя в синтезе металлоорганических и металлосодержащих соединений прямым окислением металлов / [С. В. Масленников, И. В. Спирина, А. В. Пискунов, С. Н. Масленникова] // Журнал общей химии. – 2001. – Т. 71, Вып. 11. – С. 1837–1838.
10. Влияние природы растворителя на скорость окисления металлов в апротонных средах / [С. В. Пантелеев, С. В. Масленников, А. Н. Егорочкин, В. Ю. Вакуленко] // Журнал общей химии. – 2001. – Т. 77, Вып. 6. – С. 912–916.
11. Корреляция реакционной способности элементоорганических хлоридов в реакции окисления металлов в апротонных средах / [С. В. Пантелеев, С. В. Масленников, А. Н. Егорочкин, И. В. Спирина] // Журнал общей химии. – 2007. – Т. 77, Вып. 7. – С. 1072–1074.
12. Куприн Виталий Павлович. Избирательная адсорбция органических веществ на металлах и подготовка поверхности перед нанесением покрытий : дис. ... докт. хім. наук : 02.00.05 / Куприн Виталий Павлович. – Днепропетровск, 1993. – 323 с.
13. Куприн В. П. Адсорбция органических соединений на твердой поверхности / В. П. Куприн, А. Б. Щербаков. – Киев : Наукова думка, 1996. – 162 с.
14. А. с. 1409643 А1 СССР, МКИ С07М141/08. Смазочная композиция / Б. А. Бовыкин, И. Г. Плошенко, А. П. Ранский, А. А. Митрохин, А. Я. Штанько, С. П. Сухойвой, В. Д. Седлецкий. – заявл. 26.02.1986 ; опубл. 15.07.1988, Бюл. № 26.
15. Матюхова Светлана Алексеевна. Реакции бензилгалогенидов с медью в диполярных апротонных растворителях : дис. ... канд. хім. наук : 02.00.03 / Матюхова Светлана Алексеевна. – Москва, 2005. – 185 с.
16. Пономаренко А. Г. О механизме образования полимеров трения в смазочных маслах / А. Г. Пономаренко, Г. Г. Чигаренко, Г. П. Берчан // Трение и износ. – 1981. – № 9. – С. 43–45.
17. Гаркунов Д. Н. О механизме взаимного атомного переноса меди при трении бронзы по стали / Д. Н. Гаркунов, В. Н. Лозовский, А. А. Поляков // Докл. АН СССР. – 1960. – Т. 133, № 5. – С. 1128–1129.
18. Справочник по триботехнике. Теоретические основы / Под ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 1989. – Т. 1. – 400 с.
19. Исследование структуры граничного слоя влияния комплексообразующих присадок на триботехнические свойства пары трения медный сплав-сталь / [А. С. Кужаров, В. В. Чуваев, Б. В. Меринов и др.] // Трение и износ. – 1987. – Т. 8, № 5. – С. 851–856.
20. Барчан Г. П. Исследование избирательного переноса в среде сложных эфиров монокарбоновых кислот / Г. П. Барчан, Г. Г. Чигаренко, А. Г. Пономаренко // Химия и технология топлив и масел. – 1978. – № 10. – С. 59–61.
21. Барчан Г. П. Влияние строения сложных эфиров на процесс избирательного переноса / Г. П. Барчан, Г. Г. Чигаренко, А. Г. Пономаренко // Химия и технология топлив и масел. – 1979. – № 7. – С. 36–39.
22. Пальм В. А. Основы количественной теории органических реакций / В. А. Пальм. – Л. : Химия, 1977. – 360 с.

Поступила в редакцію 14.04. 2017

Gordienko O.A., Titov T.S., Ranskiy A.P., Dykha O.V. **Research of the tribochemical system «bronze - organic additive - oil I-20A - steel».**

In this work was explored the tribochemical system «bronze – organic additive – oil I-20A – steel» in terms of the formation of coordination compounds of copper (II) under mechanical activation of metal surfaces of friction pair and organic additives. It was found that lubricant compositions contained organic solvents with high donor value  $DN_{SbCl_5}$ , in friction pair «bronze – steel» had the best anti-wear properties, which clearly points to the crucial role of donor activity of organic aprotic solvents during oxidation of metals. Herewith the decisive influence of donor activity of organic solvents as a part of lubricating compositions on wear remained unchanged regardless of the contact pressure in the studied friction pair, and a significant improvement of tribotechnical performance of lubricant compositions contained organic additives compared to «pure» oil I-20A depended on the electron-donor ( $DN_{SbCl_5}$ ) and adsorption ( $I_s$ ) activity of the studied organic additives.

**Key words:** organic additives, tribochemical system, coordination compounds of copper (II), electron-donor activity, adsorption activity.

## References

1. Ranskiy A. P., Bojchenko P. V., Gordienko O. A., Didenko N. O., Voloshinec' V. A. Kompozycijni mastyl'ni materialy na osnovi tioamidiv ta ih kompleksnyh spolk. Syntez. Doslidzhennja. Vykorystannja, Vinnycja, VNTU, 2012, 328 p.
2. Ranskiy A. P., Gordienko O. A. Doslidzhennja prysadnyh materialiv na osnovi trygalogenpohidnyh karbonovyh kyslot v olyvi Y-40, Problemy trybologii', 2012, № 1, P. 55–61.
3. Ranskiy Anatolij Petrovych. Koordynacijni spoluky dejakyh 3d-metaliv z aromatychnymy ta geterocyklichnymy tioamidamy : dyp. ... dokt. him. nauk : 02.00.01, Dnipropetrovs'k, 2003, 327 p.
4. Ranskiy A. P., Didenko N. O., Titov T. P., Bezvozzjuk I. I. Mehanizm vybirkovogo perenesennja z tochky zoru rezonansnogo potencialu za Nechajevym [elektronnyj resurs], Naukovi praci Vinnyc'kogo nacional'nogo tehničnogo universytetu, 2010, № 4, 4 p. <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/230/228>.
5. Jur'ev Ju. K. Prakticheskie raboty po organicheskoj himii. Izdanie 2-e, dop., M., Iz-vo Moskovskogo universiteta, 1961, Vyp. 1 i 2., 420 p.
6. Skopenko V. V., Garnovskij A. D., Kokozej V. N., Kuzharov A. P., Gohon- Zorilla G. Prjamoj sintez koordinacionnyh soedinenij, K., Venturi, 1997, 172 p.
7. Garnovskij A. D., Rjabuhin Ju. I., Kuzharov A. P. Prjamoj sintez koordinacionnyh soedinenij iz metallov v nevodnyh sredah, Koordinacionnaja himija, 1984, T. 10, № 8, P. 1011–1033.
8. Maslennikov Stanislav Vladimirovich. Okislenie metallov organicheskimy soedinenijami v aprotionnyh rastvoriteljah : dip. ... dokt. him. nauk : 02.00.08, 02.00.04, Nizhnij Novgorod, 2005, 201 p.
9. Maslennikov P. V., Spirina I. V., Piskunov A. V., Maslennikova P. N. Rol' rastvoritelja v sinteze metalloorganicheskih i metallosoderzhashih soedinenij prjamyj okisleniem metallov, Zhurnal obshhej himii, 2001, T. 71, Vyp. 11, P. 1837–1838.
10. Panteleev P. V., Maslennikov P. V., Egorochkin A. N., Vakulenko V. Ju. Vlijanie prirody rastvoritelja na skorost' okislenija metallov v aprotionnyh sredah, Zhurnal obshhej himii, 2001, T. 77, Vyp. 6, P. 912–916.
11. Panteleev P. V., Maslennikov P. V., Egorochkin A. N., Spirina I. V. Korreljacija reakcionnoj sposobnosti jelementoorganicheskih hloridov v reakcii okislenija metallov v aprotionnyh sredah, Zhurnal obshhej himii, 2007, T. 77, Vyp. 7, P. 1072–1074.
12. Kuprin Vitalij Pavlovich. Izbiratel'naja adsorbicija organicheskih veshhestv na metallah i podgotovka poverhnosti pered naneseniem pokrytij : dip. ... dokt. him. nauk : 02.00.05, Dnepropetrovsk, 1993, 323 p.
13. Kuprin V. P., Shherbakov A. B. Adsorbicija organicheskih soedinenij na tverdoj poverhnosti, Kiev, Naukova dumka, 1996, 162 p.
14. Bovykin B. A., Ploshenko I. G., Ranskiy A. P., Mitrohin A. A., Shtan'ko A. Ja., Suhovoj P. P., Sedleckij V. D. A. p. 1409643 A1 SSSR, MKI C07M141/08. Smazochnaja kompozicija, zajavl. 26.02.1986, opubl. 15.07.1988, Bjul. № 26.
15. Matjuhova Svetlana Aleksejevna. Reakcii benzilgalogenidov s med'ju v dipoljarnykh aprotionnyh rastvoriteljah : dip. ... kand. him. nauk : 02.00.03, Moskva, 2005, 185 p.
16. Ponomarenko A. G., Chigareno G. G., Berchan G. P. O mehanizme obrazovanija polimerov trenija v smazochnyh maslah, Trenie i iznos, 1981, № 9, P. 43–45.
17. Garkunov D. N., Lozovskij V. N., Poljakov A. A. O mehanizme vzaimnogo atomnogo perenosa medi pri trenii bronzy po stali, Dokl. AN SSSR, 1960, T. 133, № 5, P. 1128–1129.
18. Spravochnik po tribotehnike. Teoreticheskie osnovy / Pod red. M. Hebdy, A. V. Chichinadze, M., Mashinostroenie, 1989, T. 1, 400 p.
19. Kuzharov A.P., Chuvaev V.V., Merinov B.V., Suchkov V.V., Kudrjavcev V.I. Issledovanie struktury granichnogo sloja i vlijanija kompleksobrazujushih prysadok na tribotehnicheskie svojstva pary trenija mednyj splav – stal', Trenie i iznos, 1987, T.8, №5, P. 851–856.
20. Barchan G. P., Chigareno G. G., Ponomarenko A. G. Issledovanie izbiratel'nogo perenosa v srede slozhnyh jefirov monokarbonovyh kislot, Himija i tehnologija topliv i masel, 1978, № 10, P. 59–61.
21. Barchan G. P., Chigareno G. G., Ponomarenko A. G. Vlijanie stroenija slozhnyh jefirov na process izbiratel'nogo perenosa, Himija i tehnologija topliv i masel, 1979, № 7, P. 36–39.
22. Pal'm V. A. Osnovy kolichestvennoj teorii organicheskih reakcij, L., Himija, 1977, 360 p.