

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

УДК 621.891

В. І. Кубіч, асп.,

Л. Й. Івченко, д-р техн. наук, проф.

ПРО ВПЛИВ ВМІСТУ КОМПОНЕНТІВ ГАЛІЄВО-ІНДІЄВОГО СЕРЕДОВИЩА НА ТРИБОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРИБОЗ'ЄДНАННЯ

Запорізький національний технічний університет,
ivschenko@zstu.edu.ua

Наведено результати випробувань на зносостійкість трибоз'єднання з покриттям, що містить мідь, яке сформовано за різного змісту компонентів галієво-індієвого середовища, що дозволило оцінити ступінь впливу вмісту компонентів середовища на триботехнічні характеристики трибоз'єднання і визначити його більш значущий склад.

Актуальність. Відомо, що зносостійкість покриттів, які містять мідь і формуються на поверхнях тертя методом фінішної антифрикційної безабразивної обробки (ФАБО), багато в чому обумовлюється властивостями поверхнево-активного середовища, в якому здійснюється обробка, що в цілому істотно впливає на триботехнічні властивості пар тертя [1–5].

Таким середовищем може бути евтектичний галієво-індієвий сплав (масова частка, %: галій ГЛ-2 – 88; індій Ін-2 – 10; мідь – 2). Із використанням такого середовища отримано покриття, що містить мідь з олов'янистої бронзи БрОФ4-0,25 на сталевій поверхні. Випробування на зносостійкість пари тертя «ролик (сталь 45) – колодка (АО9-1)» показали порівняно високі триботехнічні властивості [4].

Очевидним є те, що вміст компонентів у галієво-індієвому середовищі буде до певної міри впливати на формування покриття, що містить мідь, та обумовлювати надалі такі триботехнічні характеристики трибоз'єднання, як коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування. Проте таких відомостей поки що немає [1; 3–6]. Але цей факт становить певний інтерес щодо проведення випробувань на зносостійкість трибоз'єднання, у якому покриття, що містить мідь, сформоване з різноманітним умістом компонентів галієво-індієвого середовища.

Отримані результати дозволять як оцінити ступінь впливу вмісту компонентів поверхнево-активного середовища на триботехнічні характеристики трибоз'єднання, так і визначити його більш значущий склад.

Методи дослідження. Для проведення досліджень використали дві партії зразків, по п'ять у кожній: ролики, виготовлені зі сталі 45ХН2МФА, $d = 50$ мм, параметр шорсткості поверхні $R_a=1,25$ мкм; колодки, виготовлені з високооолов'янистого алюмінію АО20-1 (ГОСТ 14113-78), матеріал основи сталь 08 кп (ГОСТ 1050-88), площа тертя 120 мм^2 .

Поверхні дисків обробляли на додатковому пристрої до токарно-гвинторізного верстата ПТ-1М шляхом притиснення інструмента – бронзового прутка (БрОФ4-0,25) з тиском $0,7-0,77$ МПа до зразка – ролика, що обертається із швидкістю 65 хв^{-1} , за поздовжньої подачі $0,8 \text{ мм/об}$, кількість проходів становила 4–6 [4; 8].

Для приготування галієво-індієвих сплавів використовували співвідношення компонентів, які наведено в табл. 1. Такі співвідношення компонентів середовища обумовлені передусім вибраними інтервалами навколо ефектичної точки $14,2 \%$ (ат.) In ($15,9 \text{ }^\circ\text{C}$) діаграми стану Ga-In, що дозволяє сплавам передбувати в рідкому агрегатному стані відповідно до діапазону температур ($15,9 - 23$) $\sim 2100 \text{ }^\circ\text{C}$, а також вмісту індію у відомому сплаві. У цьому дослідженні найбільшу увагу привертає сплав у рідкому агрегатному стані, але його використання обмежено можливостями пристрою для нанесення покриттів. Оскільки мідь використовувалася у складі середовища як компонент, що додає твердості сплаву, то її використання в середовищі недоцільне [7].

Таблиця 1

Співвідношення компонентів у складі середовища

Номер сплаву	Уміст компонентів, % (масових частках)	
	Галій ГЛ-2	Індій Ин-2
1	81	19
2	83	17
3	87	13
4	92	8
5	94	6

Для порівняльних випробувань використовували як зразок ролик-колодку без покриття. Випробовували зразки на машині, призначеній для випробування матеріалів на тертя і зношування моделі СМЦ-2. У комплект машини входили: потенціометр КСП2-005 для вимірювання і записування моменту тертя у трибоз'єднаннях, що випробуються; електропривід комплектний тиристорний ЕКТ 20/380 для безступінчастої зміни частоти обертання привідного вала машини.

Зразки випробували за схемою «обертовий ролик – нерухома колодка» в умовах змащування моторним мастилом LUKOL-STANDARD SAE 15W/40 SF/CC з частотою обертання 320 хв^{-1} , тиск у контакті $0,9 \text{ МПа}$, в два етапи:

– тертя зразків у мастилі за допомогою часткового занурення ролика в мастильну ванну – 20 хв;

– тертя зразків, витертих досуха дрантям без надходження мастила, тобто в умовах молекулярного шару, що сформувався, на поверхнях зразків з мастильного середовища, – 17 хв.

Як критерій зношування припускали зміну маси зразків за період зношування. Зразки зважували на аналітичних вагах ВЛА-200. Коефіцієнт тертя визначали відповідно до умов навантаження, геометричних розмірів ролика і значень моменту тертя, який реєстрували потенціометром КСП2-005 у мілівольтах. Для вимірювання температури в зоні тертя застосовували мультиметр ДТ-835 з термодіапазоном ТР-01А з діапазоном вимірюваних температур – $18 \sim 712 \text{ }^\circ\text{C}$. Інтенсивність зношування зразків і величину шляху тертя визначали розрахунковим шляхом [9].

Результати досліджень і обговорення. У табл. 2 наведено усереднені результати розрахунку інтенсивності зношування за двома партіями зразків, шлях тертя становив 1900 м.

Таблиця 2

Значення інтенсивності зношування зразків

№ п/п	Найменування	Номер сплаву					Зразок без покриття
		1	2	3	4	5	
1	Інтенсивність зношування колодки $I_1, 10^{-8}$	2,46	5,82	5,99	6,61	8,98	19,1
2	Інтенсивність зношування ролика $I_2, 10^{-9}$	1,14	0,69	0,75	0,47	1,07	0,54

Аналіз даних, наведених в табл. 2, свідчить про таке.

Для колодок зменшення інтенсивності зношування зі збільшенням вмісту компонента індію становить: 2,12; 2,88; 3,18; 3,28; 7,72 рази відносно інтенсивності зношування колодки, що взаємодіє під час тертя з роликом без покриття. При цьому відзначається нелінійність характеру зміни зношування: різке зниження в діапазоні 6–8 % (сплави 4, 5); плавне зниження в діапазоні 8–17 % (сплави 2, 3) і знову різке зниження в діапазоні – 17–21 % (сплави 1, 2).

Для роликів спостерігається амплітудний характер зміни інтенсивності зношування відносно інтенсивності зношування ролика без покриття. До того ж мінімальному 6 % (сплав 5) і максимальному 19 % (сплав 1) вмістам індію відповідає інтенсивність зношування відповідно в 2,1 і 1,98 рази вища, ніж без покриття. Водночас за вмісту індію близько 8 % (сплав 4) інтенсивність зношування ролика в 1,14 рази нижча, ніж ролика без покриття. За вмісту індію близько 17% (сплав 2) інтенсивність зношування в 1,08 рази менша, ніж за його вмісту 13 % (сплав 3) і тільки в 1,27 рази більша, ніж ролика без покриття.

Викладене може свідчити про те, що вміст індію в поверхнево-активному середовищі істотно впливає на процеси, які супроводжуються втратою матеріалу під час тертя:

– для роликів це як порушення адгезійного зв'язку структури із вмістом міді з підкладкою матеріалу зразка, так і руйнування структури покриття (БрОФ4-0,25+Ga+In), що безпосередньо сама утворилася, при механічній взаємодії мікронерівностей поверхонь;

– для колодок це як руйнування антифрикційного шару (Al+Sn+Cu), так і можливе збагачення компонентами поверхнево-активного середовища Ga+In і покриття Cu+Sn в умовах захоплення локальних зон контакту;

– для структури покриття це зміна вмісту його компонентів, тобто можливий вихід легувальних елементів з бронзи і як створення чистої міді, її сполук, наприклад інтерметаліду CuGa_2 , так і виділення олова і індію у вигляді окремої фази в результаті перебігу хіміко-фізичних процесів, обумовлених відновною дією галію.

Характер зміни інтенсивності зношування роликів і колодок в діапазоні вмісту індію 17–19 % (сплави 1, 2) добре узгоджується з

властивістю індію підвищувати змочувальну здатність галію до зон його поверхневої взаємодії, що значно підвищує ступінь активності дії галію [3]. Через це можуть активізуватися процеси, пов'язані із збільшенням міцності адгезійного зв'язку покриття з підкладкою матеріалу зразка, ініціацією виділення окремих фаз, їх як відведенням в змашувальне середовище, так і перенесенням на поверхню контакту, що в цілому зумовлює зниження інтенсивності зношування пари тертя «ролик-колодка».

Графіки змін значень коефіцієнта тертя і температури в зоні тертя зразків упродовж часу випробувань зображено на рис.1 і 2. Аналіз зміни значень коефіцієнта тертя в зоні контакту зразків показує, що характер впливу складу середовища на механічну і молекулярну складові коефіцієнта тертя для різних сплавів неоднозначний і має істотні відмінності.

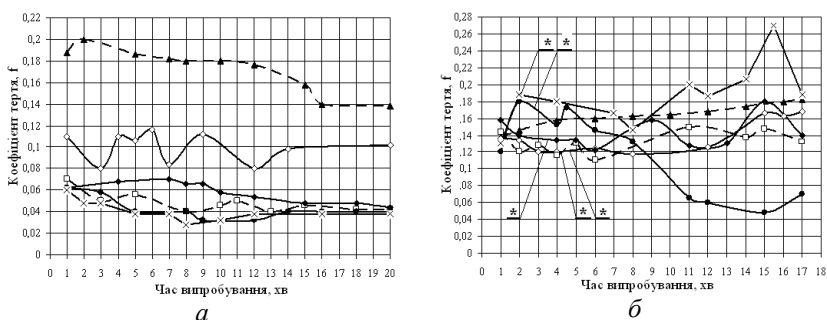


Рис. 1. Графіки зміни коефіцієнта тертя: *a* – тертя у змашувальному середовищі; *б* – тертя без надходження мастила; \blacktriangle – зразки без сплаву; \bullet – сплав 1; \blacklozenge – сплав 2; \square – сплав 3; \times – сплав 4; \diamond – сплав 5; * – початок утворення «виділеного складу»

На першому етапі випробувань (рис. 1, *a*, 2, *б*) зразки зі сплавами 1–4 порівняно із зразками без сплаву показали:

- зниження коефіцієнта тертя в перші хвилини в 3,4 рази, наприкінці етапу в 5 разів. Стабілізація коефіцієнта тертя в цих зразках спостерігалася на 2,5 хвилини раніше, проте він не стабілізується у зразках зі сплавом 5, для якого значення коефіцієнта тертя зменшилося відповідно в 2 рази, мало періодичний характер, проте сталий режим стабілізувався приблизно в той час, що і для попередніх зразків;
- зниження температури в зоні тертя у перші хвилини в 1,7

разу, наприкінці етапу в 1,5 разу. Стабілізація температури настала в цих зразках на 7 хвилин раніше. А в зразках зі сплавом 5 спостерігалось зростання температури до температури зразків без сплаву.

Найменші значення коефіцієнта тертя і температури мали зразки зі сплавами 1, 4.

Стабілізаційні процеси, що спостерігалися на другому етапі випробувань, показано на рис.1, б, 2, б.

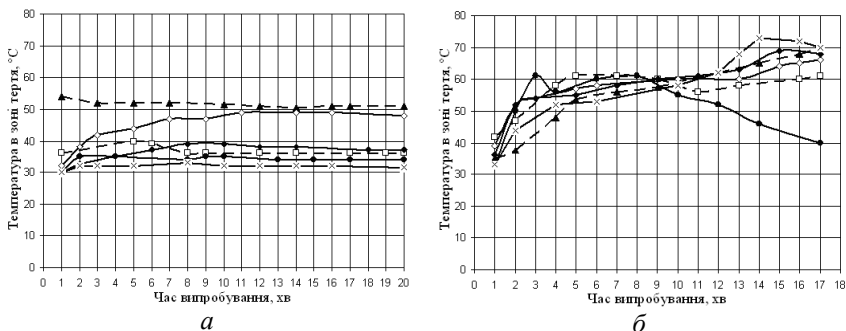


Рис. 2. Графики зміни температури в зоні тертя: а – тертя у змащувальному середовищі; б – тертя без надходження мастила; ▲ – зразки без сплаву; ● – сплав 1; ◆ – сплав 2; □ – сплав 3; × – сплав 4; ◇ – сплав 5

Для зразків зі сплавами 2, 3, 5 зміна коефіцієнта тертя була періодичною, при цьому його значення відносно зразків без сплаву на 6-й хвилині випробувань зменшилися в середньому в 1,3 разу. Далі спостерігалась динаміка періодичного збільшення, і на 17-й хвилині зменшення коефіцієнта тертя становило відповідно 1,3; 1,37; 1,08 разу. Коефіцієнт тертя зразків без сплаву збільшувався рівномірно. Для зразків зі сплавами 1, 4 також спостерігався періодичний характер зміни коефіцієнта тертя, проте його значення вже до 2-ї хвилини випробувань перевершувало значення коефіцієнта зразків без сплаву в 1,23; 1,29 разу. Далі значення коефіцієнта тертя зменшувалося і на 8-й хвилині випробувань воно становило 1,21 і 1,1 разу відповідно. Потім коефіцієнт тертя зразків зі сплавом 1 став зменшуватися, і на 15-й хвилині було зафіксовано його значення 0,048, що в 3,7 разу менше від значення коефіцієнта зразків без сплаву. Для зразків зі сплавом 4 коефіцієнт тертя навпаки збільшувався, і до 15-ї хвилині його значення в 1,5 разу перевищувало

коефіцієнт зразків без сплаву.

Температура для зразків зі сплавами 2, 4, 5 і зразків без сплаву збільшувалася протягом усього часу випробувань, за винятком того, що для сплаву 4, починаючи з 14-ї хвилини спостерігалася її зниження. Температура для зразків зі сплавом 3 спочатку зростала до 5-ї хвилини, потім відбувалося її зменшення до 11-ї хвилини з подальшим незначним збільшенням до 17-ї хвилини. Температура для зразків зі сплавом 1 також спочатку збільшувалася до 3 хвилини, потім був незначний спад, зростання до такого ж значення і стабілізація впродовж 3 хвилин з подальшим зменшенням.

Найменші значення коефіцієнта тертя і температури мали зразки із сплавами 1, 3.

Під час проведення другого етапу випробувань було виявлено виділення на поверхнях тертя складу темного кольору, можливо колоїдної структури, з в'язкісними властивостями, що щільно покриває всю поверхню ролика і колодки. У процесі тертя залишкова кількість «виділеного складу» відкладалася навколо колодки на поверхні її утримувача (рис. 3, *а*, *б*; 4). Час початку утворення «виділеного складу» (позначено на рис.1, *б*) збігався зі стрибком температури в зоні тертя. Цей час для зразків зі сплавом 4 становив 2 хв; зі сплавом 1 – 2,5 хв; зі сплавами 2, 3, 5 – від 3,5 до 4,5 хв.

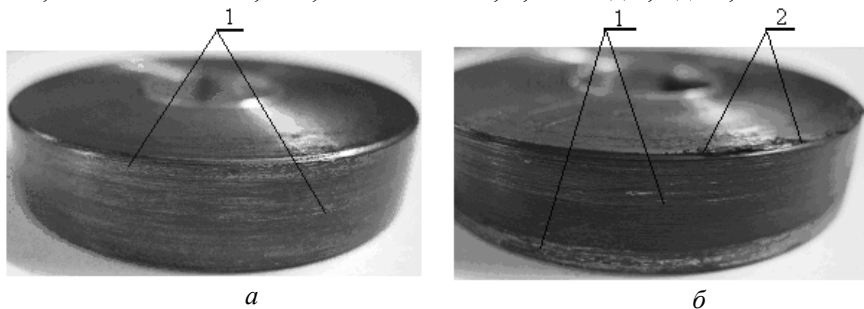


Рис. 3. Ролики після випробувань: *а* – ролик без «виділеного складу»: 1 – структура, що містить мідь; *б* – ролик з «виділеним складом»: 1 – структура, що містить мідь, під «виділеним складом»; 2 – згустки «виділеного складу» на торцевій поверхні

Склад галієво-індієвого середовища, взаємодіючи з поверхнею підкладки, як ролика, так і колодки, сприяє активізації утворенню активних центрів для формування молекулярного адсорб-

ційного шару зі змащувальної композиції, тобто вибудовуванню ізомерів (вертикальна, похила орієнтація молекулярних ланцюгів) щодо поверхні тертя і утворенню граничного шару певної будови. Причому інтенсивність утворення такого шару і його відновлення у разі руйнування обумовлюється ступенем впливу компонентів на зміну поверхневої енергії таких активних центрів. Саме ступінь інтенсивності перебігу зазначених процесів і сприяє зниженню молекулярної складової коефіцієнта тертя.

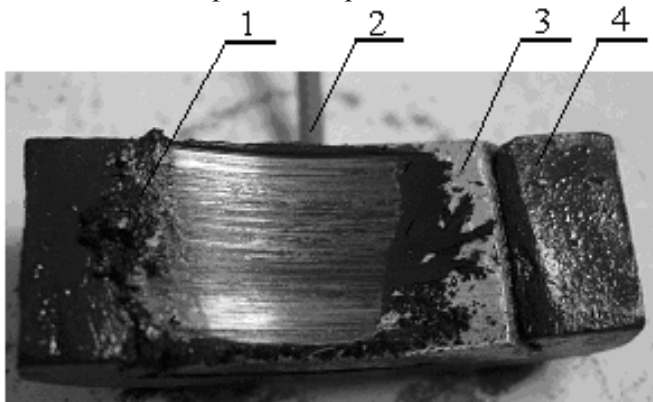


Рис. 4. Колодка після випробувань: 1 – «виділений склад»; 2 – провід до термопар; 3 – колодка; 4 – утримувач

Наявність у зонах контакту матеріалів, що мають різну пластичність ($\sigma_{T_{Ga}} < \sigma_{T_{In}} < \sigma_{T_{Sn}} < \sigma_{T_{Cu}} < \sigma_{T_{Al}} < \sigma_{T_{Fe}}$) відносно одне одного сприяє утворенню збільшених площин контакту, що формуються на структурному каркасі з профілів поверхні зразків з достатньою величиною міцності адгезійного зв'язку.

Збільшення контурної площини призводить до зниження тиску в зоні контакту, зменшення теплової напруженості в цілому і відповідно до зниження механічної складової коефіцієнта тертя. Співвідношення величин складових середовища спочатку зумовлюють кількість фаз галію і індію в евтектичному сплаві, а надалі інтенсифікують створення нових фаз, що виділяються.

Висновки. Результати випробувань на зносостійкість трибоз'єднання з покриттям, що містить мідь, сформованим за різного вмісту компонентів галієво-індієвого середовища, показали неод-

нозначний вплив складу середовища на його триботехнічні характеристики. Виявлена тенденція до поліпшення показників зносостійкості зі збільшенням вмісту одного з компонентів середовища – індію. При цьому найбільш значущий склад середовища може відповідати вмісту індію в 17–19 %.

Виявлено факт утворення «виділеного складу» зі значущими антифрикційними властивостями, механізм виникнення якого поки залишається відкритим, що потребіє проведення додаткових досліджень.

Отримані дані можна використовувати як основу для формування покриттів, що містять мідь, з поліпшеними показниками зносостійкості.

Список літератури

1. *Гаркунов Д.Н.* Триботехника. Износ и безызносность / Гаркунов Д.Н. – М.: Изд-во МСХА, 2001.– 616 с.

2. *Кубич В.И.* К методике исследования избирательного переноса в трибосопряжении «шейка-покрытие-вкладыш» ДВС / Кубич В.И., Ивченко Л.И.// Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2007. – №2 – С.134–138.

3. *Степанов В.Н.* Повышение ресурса автомобильных двигателей при ремонте способом финишной антифрикционной безабразивной обработки. /Степанов В.Н., Колчаев А.М.// Автомобильный транспорт.– 1999. –№10 – С.38–40.

4. *Пат. № 20603000* Российская Федерация, МПК⁶ C23C26/00. Способ фрикционно-механического нанесения антифрикционного покрытия / Колчаев А.М., Степанов В.Б.; заявитель и патентообладатель Рязанское высшее военное автомобильное инженерное училище. – № 93057526/02; заявл.28.12.93; опубл. 20.05.96, Бюл. 17/2000.

5. *Балабанов В.И.* Повышение качества отремонтированных двигателей внутреннего сгорания путем реализации избирательного переноса при трении./ Балабанов В.И.// Вестник машиностроения. 2001. – №8. – С.14–19.

6. *Яценко С.П.* Индий. Свойства и применение. – М.: Наука, 1987. – 256 с.

7. *Еремин И.И.* Галлий, – М.: Металлургия, 1987.– 161 с.

8. *А.с. 1765258 СССР*, МКИ³ C23C 26/00. Устройство для фрикционно-механического нанесения покрытий / В.И. Кубич, А.М. Колчаев (СССР).–№ 4846576/02; заявл.02.07.90; опубл.30.09.92, Бюл. №36.

9. *Куксенова Л.И.* Методы испытаний на трение и износ. – М.: Ин-

термет інжиниринг, 2001.– 357 с.

УДК 621.891

Кубич В.И., Івченко Л.И. **О влиянии содержания компонентов галлиево-индиевой среды на триботехнические характеристики сопряжения**// Проблемы тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2009. – Вип. 52. – С.92–101.

Приведены результаты испытаний на износостойкость трибосопряжения, с медьсодержащим покрытием, сформированным при разном содержании компонентов галлиево-индиевой среды, что позволило оценить степень влияния содержания компонентов среды на триботехнические характеристики трибосопряжения и определить ее более значимый состав.

Рис. 4, табл. 2, список літ. 9 найм.

Kubich V.I., Ivschenko L.I. **About influence of maintenance of components of galliy-indiy environment on tribotechnical characteristics of tribounit**

The results of tests are produced on wearproofness of tribounit, with copper bearing coverage, formed at different maintenance of components of galliy-indiy environment, that allowed to estimate the influence degree of environment components maintenance on tribotechnical characteristics of tribounit and define it more meaningful composition.

Стаття надійшла до редакції 11.09.09.