

*Е. А. Кульгавий, канд. техн. наук., старш. наук. співроб.,  
М. В. Кіндрачук, д-р техн. наук, проф.,  
Ю. Л. Хлевна, асп.  
А. П. Данілов, асп.*

## **ТРИБОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИПРАЦЮВАННЯ ТА СТАЦІОНАРНИХ ПРОЦЕСІВ**

Національний авіаційний університет, [yuliya-khlevna@yandex.ru](mailto:yuliya-khlevna@yandex.ru)

*Показано, що при третій бронзі по сталі та по газотермічними покриттям в мастилі АМГ–10 механізм припрацювання визначають процеси вибіркового переносу, в результаті якого на поверхнях тертя утворюються аморфізовані нанорозмірні структури, збагачені міддю. Визначено часові характеристики та характеристики зношування припрацювання в досліджуваних системах.*

**Постановка задачі.** Використання різноманітних покриттів на сьогодні має широке розповсюдження в галузях промисловості. Так, область застосування титанових сплавів в авіації може бути істотно розширена, якщо на них наносити покриття з антифрикційними властивостями, які будуть працювати без погіршення механічних характеристик на етапі припрацювання та в стаціонарному режимі. Перспективними в цьому напрямку є газотермічні технології: газополуменеві, плазмові, детонаційні напилення, які в комплексі мають надзвичайно широкий діапазон технологічних режимів і матеріалів. В даній роботі досліджені закономірності припрацювання трибологічних систем: ШХ–15 по Бр.АЖМц–10–3–1,5, газотермічних покриттів (плазмових) по бронзі Бр.АЖМц – 10 – 3 – 1,5 при третій в гідрорідині АМГ–10 табл. 1.

Трибологічні системи відкриті, вони обмінюються з навколишнім простором енергією, речовиною та інформацією. На еволюційному етапі припрацювання системи переходять зі стану, що задається технологією, в стаціонарний стан, обумовлений самим процесом. Крім початкового припрацювання при введенні в експлуатацію, припрацювання відбувається також при кожному запуску. На даному етапі система переходить до експлуатаційних режимів, коли швидкість, на-

вантаження і температура змінюються в оптимальному, обмеженому діапазоні. Вихід навіть одного параметра за межі діапазону з великою ймовірністю викликає аномальний стан відмов.

*Таблиця*

**Результати дослідження припрацювання газотермічних покриттів та ШХ – 15 з контртілом БрАЖМц10–3–1,5 в рідині АМГ–10**

№ п/п	Трибосистема	$I_0$	$\sigma$	$I$	$\sigma$	$\mu_{пр.}$	$\mu_{ст.}$	4Т, (год)
1	TiC–Cr <sub>2</sub> –Ni	25	0,38	8,34	0,35	0,23	0,17	1,2
	БрАЖМц10-3-1,5	7,3	0,38	1,35	0,35			
2	TiC–Fe	15,3	0,4	3,22	0,4	0,23	0,17	1,6
	БрАЖМц10-3-1,5	3,5	0,4	0,26	0,4			
3	TiC–Fe–Al	38	0,4	16,37	0,32	0,29	0,18	1,7
	БрАЖМц10-3-1,5	1,1	0,4	0,22	0,32			
4	ШХ – 15	13,5	0,4	0,8	0,3	0,3	0,17	0,5
	БрАЖМц10-3-1,5	2,4	0,4	0,75	0,3			

Етап припрацювання антифрикційних систем характерний підвищеною інтенсивністю зносу і меншими гранично допустимими навантаженнями в порівнянні зі стаціонарними станами. Більше 70% зносу у вузлах тертя автомобільних двигунів відбувається на етапі початкової роботи і припрацюванні кожного запуску [1]. Подібні обмеження існують в авіації. Щоб уникнути аномальних станів відмов при кожному запуску двигуна здійснюється припрацювання за спеціальною програмою, при цьому навантаження збільшуються від режимів малого газу до зльотного, здійснюється постійний контроль акустичного та вібраційного спектрів, температури мастила, а також найбільш відповідальних вузлів: головок циліндрів поршневих двигунів, підшипників ротора газотурбінних двигунів та ін [2].

Зменшення зносу від процесу припрацювання еквівалентно збільшенню ресурсу, а скорочення часу припрацювання – економії експлуатаційних витрат, тому цим питанням завжди приділялася достатня увага. Для скорочення часу припрацювання і зносу від даного періоду роботи, припрацювання здійснювалось при зростаючих навантаженнях, розроблялися мастила для припрацювання,

присадки [3]. До теперішнього часу екстенсивні методи емпіричного вибору матеріалів і режимів вичерпали свої можливості, для успішного вирішення проблем припрацювання потрібні нові підходи, засновані на знанні тонких електрон-іонних механізмів, які протікають у контакті трибосистеми, що є метою цього дослідження.

**Методика дослідження.** Випробування покриттів проводили на установці [4] за схемою «кільце-сектор». Відповідно, поверхня з покриттям виконана у вигляді сектора, оброблялася до шорсткості  $R_a = 0,32$  мкм, а Бр.АЖМц–10–3–1,5 у вигляді кільця  $\varnothing 50$  мм, коефіцієнт перекриття – 0,2. Установка дозволяє проводити випробування зносу еволюційного етапу припрацювання, при навантаженнях 1 – 40 МПа, швидкості ковзання 1 м/с – 3,7 м/с в мастилі АМГ–10. Гідрорідина АМГ–10 (авіаційне мастило гідравлічне, ГОСТ 6794–53).

Параметри шорсткості поверхні оцінювали з застосуванням профілографа ВЭИ – «Калибр» і мікроінтерферометра МИИ–4. Поверхневі структури, їх хімічний склад а також склад продуктів зносу вивчали методами оптичної та растрової мікроскопії. Закінчення припрацювання визначали по стабілізації коефіцієнта тертя. Дослідженнями встановлено, що шлях коливався від 0,27 км до 0,918 км, тому фіксували шлях в межах 1км, часовий інтервал 4Т. Другий замір – через 5км тертя при швидкості 0,15 м/с, навантаженні 6 МПа. Знос визначався ваговим методом за допомогою аналітичної ваги, з точністю 0,1 мг і переводився в лінійний.

**Результати дослідження.** Встановлено, [5] що інтенсивність зношування в часі  $t$  можна представити у вигляді

$$di(t)/dt = -(i_0 - \langle i \rangle)/T, \quad (1)$$

де  $i_0$ ,  $\langle i \rangle$  – початкове і середнє стаціонарне значення швидкості зносу;  $T$  – час припрацювання.

При  $t \gg T$  – стаціонарний процес з постійним середнім і дисперсією. Рішенням цього рівняння є функція  $I(t)$  – знос, при  $I(0) = 0$  має вигляд

$$i(t) = (i_0 - \langle i \rangle)\exp(-t/T) + \langle i \rangle. \quad (2)$$

Вираз є функціоналом і його можна представити числом  $I_0$  (рис. 1). Цю величину оцінювали як проекцію лінії стаціонарного зносу на час  $t = 0$

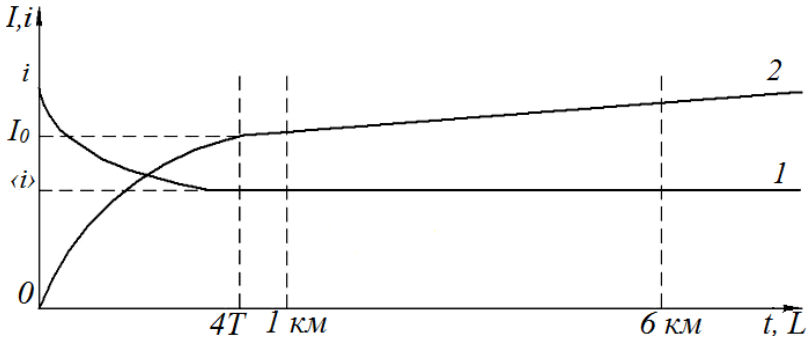


Рис. 1. Залежності інтенсивності зносу  $i(t)$  - 1 і зносу  $I(t)$  - 2 від часу тертя  $t$  та шляху  $L$

Стійкість стаціонарних станів забезпечує конкуренція вільної енергії та ентропії в трибоструктурі, при цьому, друга похідна  $d^2i(t)/dt^2$  протилежна за знаком відхилення  $i(t)$  від середнього значення. Середнє значення є точкою перегину функції  $i(t)$ , в якій вільна енергія і ентропія міняються місцями за ступенем впливу на процес. Стійкість стаціонарного стану визначає мала її частина, яка пов'язана з речовиною трибоструктури, вона може як збільшуватися, так і зменшуватися, повна ж ентропія в процесі тертя завжди зростає.

У тому випадку, коли трибоструктура когерентна по всій площі контакту – конкуренція вільної енергії  $G$  і ентропії  $S$  в трибоструктурі породжує стійкі періодичні процеси, відповідні моделям Лоткі-Вольтера, Брюсселятора та ін [6].

Досліджений механізм і закономірності припрацювання в трибологічних системах, які включають бронзу Бр.АЖМц–10–3–1,5, гідрорідину АМГ – 10, сталь ШХ – 15 і плазмові покриття. Визначено знос від припрацювання  $I_0$  і тривалість припрацювання як  $4T$ . Результати дослідження представлені в таблиці, де  $I_0$  – інтенсивність зношування етапу припрацювання,  $I$  – інтенсивність зношування стаціонарного періоду,  $\sigma$  – стандартне відхилення етапу припрацювання та стаціонарного періоду,  $\mu_{\text{пр.}}$  – коефіцієнт тертя етапу припрацювання,  $\mu_{\text{ст.}}$  – коефіцієнт тертя стаціонарного процесу,  $4T$  – час припрацювання.

При взаємодії мастила АМГ–10 з поверхнями тертя твердих тіл полярно активні молекули газової і рідкої суміші потрапляють в

електричне силове поле поверхні металу, приєднуються до її активних центрів, формуючи адсорбований шар орієнтованих молекул.

Електричне поле поверхонь прагне орієнтувати полярні молекули і індуктує такий момент у неполярних молекул, які також адсорбуються на поверхні. Це не виключає існування в певні моменти, на окремих ділянках безпосереднього контакту поверхонь твердих тіл. Вузли тертя працюють в умовах граничного мащення рідиною АМГ–10, що є сприятливим для виникнення металевого контакту і збільшення інтенсивності зносу при запуску, зміні напрямку руху, динамічних навантажень.

Встановлено, що процеси формування та властивості трибологічних структур в значній мірі залежать від фазового складу, дисперсності, механічних і електрохімічних властивостей матеріалу твердих тіл і мастила. Структури, що утворились функціонують лише безпосередньо в процесі тертя. Однак про існування їх свідчать найтонші аморфізовані шари на поверхнях тертя, які можна безпосередньо спостерігати і досліджувати по закінченні процесу. Про хімічний і фракційний склад (рис. 2) трибологічних структур можуть інформувати результати дослідження продуктів зносу, мастила.

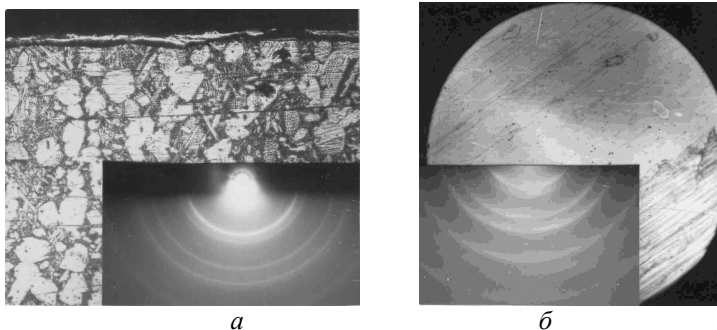


Рис. 2. Структура утворення плівки міді на поверхні:  
а – вид поверхні тертя; б – шліф

В основі механізму формування структур лежать тонкі атомно-молекулярні, в тому числі електрохімічні процеси переносу і багато-етапний синтез. Значний вплив на процес синтезу має початковий стан твердих тіл: гетерогенність структури, контраст механічних і електрохімічних властивостей різних фаз. Трибоструктури утворюються на еволюційному етапі припрацювання і потім функціонують в

стаціонарному режимі по нелінійним законам синергетики, при цьому деяка частина речовини трибоструктур випадає з трибосистеми у вигляді продуктів зносу.

**Висновки.** Рівень процесів в трибологічних системах, що включають бронзу Бр.АЖМц–10–3–1,5, гідрорідину АМГ–10, сталь ШХ– 15, плазмові покриття, визначають самоутворюючі на етапі припрацювання трибологічні структури дисипативного типу. Механізм формування таких структур пов'язаний з процесами вибіркового переносу, в результаті яких анодні елементи бронзи розчиняються в активізованій тертям гідрорідині АМГ–10, а на поверхнях тертя утворюються аморфізовані структури збагачені міддю. Крім того, в гідрорідині АМГ–10 є сполуки, здатні утворювати комплекси, які визначають мастильні властивості пари тертя покриття – контртіло. Ці структури функціонують потім у стаціонарному режимі за нелінійними законами синергетики.

Визначені часові характеристики, припрацювання та зносу в досліджуваних системах. Встановлено, що мінімальний час припрацювання і знос від даного етапу має система під номером 4 (ШХ – 15 з контртілом БрАЖМц10–3–1,5). А серед покриттів найкращий результат має  $\text{TiC-Cr}_2\text{-Ni}$  по БрАЖМц10–3–1,5.

Скориставшись лінійним наближенням рівняння переносу Больцмана встановили експоненціальний характер етапу припрацювання, на якому інтенсивність зносу зменшується від початкового до сталого стаціонарного рівня і потім флюктує близько постійного середнього з постійною дисперсією. Рідина АМГ–10 вибірково взаємодіє з елементами. Електронегативні елементи розчиняються в мастилі, електропозитивні – переносяться на контртіло, взаємодіють з продуктами механодеструкції молекул мастила, активно беруть участь у формуванні трибоструктури, зменшують рівень безпосередньої взаємодії твердих тіл у контакті.

### Список літератури

1. *Кузьменко А. Г.* Износ узлов трения двигателей при граничной смазке (обзор) / А.Г. Кузьменко, О.П. Бабак. // Проблемы трибологии. №3 – 2007. – С. 61 – 93.
2. *Сакач Р. В.* Безопасность полетов / Р.В.Сакач. – М.: Транспорт, 1989. – 239 с.
3. *Карасик И. И.* Прирабатываемость, закономерности и методы оценки влияния приработки и изнашивания на триботехнические характе-

ристики опор скольжения: дис. «Трения и износ в машинах» доктора техн. наук: 05.02.04/ Илья Исаакович Карасик. – М., 1983. – 450 с.

4. *Кіндрачук М. В.* Установка та методика визначення характеристик тертя та зношування / Е.А. Кульгавий, А.П. Данилов, Ю.Л.Хлевна// Наукоємні технології. – 2010, №2, – С. 26– 26

5. *Кульгавий Э. А.* Триботехнические характеристики и их применение //Проблемы трибологии. – 2003, № 3, С. 51 – 61.

6. *Пригожин И. С.* От существующего к возникающему / И.С. Пригожин. – М: Наука, – 1985, – 328 с.

*Кульгавий Э. А., Кіндрачук М. В., Хлевна Ю. Л., Данилов А. П.* **Триботехнические характеристики механизма приработки и стационарного изнашивания** // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2012. – Вип. 57. – С.139–145.

Показано, что при трении бронзы по стали и газотермическим покрытиям со смазкой АМГ–10 механизм приработки определяют процессы избирательного переноса, в результате которого на поверхностях трения образуются аморфизированные наноразмерные структуры, обогащенные медью. Определены временные и износые характеристики приработки в исследуемых системах.

Табл.: 1, рис. 2, список лит.: 6 наим.

*Kulgaviy E. A Kindrachuk M. V, Khlevna Y. L, Danilov A. P.* **Tribological characteristics and mechanism of burnishing steady-state wear**

It is shown that the friction of bronze on steel and thermal spray coating with a lubricant – 10 AMG engine break-defined processes of selective transfer, resulting in the formation of friction on the surfaces of amorphous nano-scale structures, enriched with copper. Defined time and running-in characteristics iznosoye systems under study.

**Ключові слова:** трибологічна система, припрацювання, стаціонарний режим роботи, зношування, газотермічні покриття.

Стаття надійшла до редакції 13.03.2012