

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.2(111).21330

*М. В. КИНДРАЧУК<sup>1</sup>, А. О. КОРНІЄНКО<sup>1</sup>, Н. М. СТЕБЕЛЕЦЬКА<sup>2</sup>,  
І. А. ГУМЕНЮК<sup>3</sup>, В. В. ХАРЧЕНКО<sup>1</sup>, А. Л. ГЛОВИН<sup>4</sup>, С. В. ФЕДОРЧУК<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна*

<sup>2</sup> *Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут», Бережани, Україна*

<sup>3</sup> *АТ «Укртелеком», Київ, Україна*

<sup>4</sup> *Відокремлений структурний підрозділ «Бережанський фаховий коледж Національного університету біоресурсів і природокористування України», Бережани, Україна*

## АНАЛІЗ І СИНТЕЗ В АВІАЦІЙНИХ ТРИБОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ

У роботі розглянуто сучасні проблеми трибології в авіаційних системах у контексті підвищення технічної безпеки та ресурсу вузлів тертя. Визначено обмеженість традиційних аналітичних методів при дослідженні складних відкритих нерівноважних систем і обґрунтовано доцільність поєднання методів аналізу та синтезу для узагальнення багатofакторних процесів тертя, зношування та відмов. Проаналізовано утворення трибологічного контакту на мікрорівні, де тертя розглядається як результат динаміки міжатомних зв'язків. Розкрито роль процесів самоорганізації та формування трибоструктур у забезпеченні стаціонарних режимів функціонування трибосистем. Показано, що стійкість таких режимів визначається динамічною рівновагою між потоками енергії та речовини і зростанням ентропії. Досліджено природу поступових і раптових відмов, зокрема автокаталітичні механізми руйнування трибоструктур. Обґрунтовано застосування ймовірнісних методів, зокрема байєсівського аналізу, для підвищення достовірності діагностики технічного стану вузлів тертя та оцінювання ризику рідкісних відмов. Комплексне використання методів синтезу, розвиток інтелектуальних систем діагностики і поглиблення розуміння внутрішньої структури трибологічних процесів розглядаються як пріоритетний напрям підвищення надійності авіаційних трибосистем.

**Ключові слова:** тертя, трибологічний контакт, трибоструктури, нерівноважні системи, методи аналізу та синтезу, ентропія, знос, раптові відмови, термодинаміка нерівноважних процесів, надійність.

**Вступ. Задачі дослідження.** Основним методом дослідження в трибології, як і в усій класичній науці, є аналіз, тобто розподіл цілого на частини, заснований на припущенні, що тільки вивчивши елементи, можна пізнати складне явище в цілому.

Тертя розглядається як опір руйнуванню містків зварювання, що утворилися між контактуючими поверхнями, а також опір пружнопластичним деформаціям поверхневих шарів твердих тіл [1]. У механічному представленні зношування – це результат втомного або когезійного руйнування поверхневих шарів твердих тіл. Докладено великих зусиль і здійснено величезні витрати, щоб оцінити вплив технологічних, конструкційних, фізико-механічних, масштабних, часових та інших факторів на ці процеси [2-6]. Однак чим ширшим і глибшим був аналіз, тим важче ставало об'єднання фрагментів у єдине ціле. Виявилось, що отримані результати мають локальне значення і їх неможливо узагальнити лінійними методами. Що більше, доведено, що будь-яка спроба прямого використання результатів аналізу при дослідженні відкритих систем та нерівноважних процесів

приречена на поразку, тому перевагу слід віддавати методу синтезу – реальному чи уявному об'єднанню фрагментів у єдине ціле [7].

Безвідмовність трибологічних систем лежить в основі технічної безпеки авіації. Контроль стану вузлів тертя гідравлічних, масляних і паливних систем, гальм, агрегатів, рухомих з'єднань займає значну частину обсягу робіт, а заміна вузлів, що відмовили, – основну статтю витрат при технічному обслуговуванні та ремонті літаків.

На відміну від традиційної науки, методи синтезу широко використовували в авіації. Вони відіграли головну роль у досягненні сучасного рівня технічної безпеки. Узагальнення всієї інформації про відмови та несправності всіх типів авіаційної техніки за весь час її існування дозволило визначити однорідність антифрикційних систем щодо невеликої кількості ознак відмови, розробити ефективну систему діагностики й періодичного контролю стану трибоспрямижень і прийняття рішень, дати статистичну оцінку таким рідкісним подіям, як поєднання відмови та катастрофи.

У першій частині цієї роботи розглядаються методи синтезу в інформаційному просторі та їх вплив на рівень безпеки літаків.

У другій частині представлено результати дослідження внутрішньої структури трибологічного контакту, показано визначальну роль синтезу при формуванні трибологічних структур та автокаталізу в процесах відмови.

**Мета дослідження** полягала в обґрунтуванні ролі методів аналізу та синтезу у вивченні трибологічних процесів авіаційних систем, виявлення закономірностей формування трибологічного контакту та трибоструктур у відкритих нерівноважних умовах, а також розроблення підходів до підвищення достовірності діагностики й оцінювання ризику відмов для забезпечення надійності та технічної безпеки вузлів тертя авіаційної техніки.

**Результати дослідження.** Технічну безпеку повітряного судна значною мірою визначають міцнісні та трибологічні властивості елементів конструкції. Під першим розуміють здатність не руйнуватися в допустимих експлуатаційних умовах, під другим – зберігати працездатність вузлів тертя й рухомих з'єднань протягом заданого ресурсу. Для забезпечення належного рівня безпеки за критеріями міцності створено розрахунково-експериментальні комплекси, що включають апріорну інформацію про відмови, систему лабораторних та натурних випробувань, методи розрахунку на статичну та втомну міцність, систему контролю на всіх етапах експлуатації повітряного судна [8].

Об'єктом дослідження трибології є трибосистеми та процеси, що відбуваються в них. Під терміном «трибосистема» розуміють сукупність двох контактуючих твердих тіл і мастильного матеріалу – твердого, рідкого, газоподібного або їхньої суміші. Прикладання стискального навантаження та відносний рух поверхонь спричиняють виникнення процесів тертя, зношування та відмови. При знятті навантаження або зупинці руху трибологічні процеси припиняються, тобто трибологічний процес у будь-який момент обов'язково перебуває у певній точці двомірного простору швидкостей і навантажень. Трибологічні системи є основним елементом вузлів тертя, рухомих з'єднань, гальм, фрикційних муфт, циліндро-поршневих і кривошипно-шатунних механізмів, силових циліндрів, амортизаційних стійок тощо.

Відмови у таких вузлах – основні причини обмеження ресурсу агрегатів, джерела авіаційних катастроф та інцидентів з технічних причин. Існує два види відмов у трибосистемах літаків: поступові та раптові.

Поступові відмови виникають унаслідок зношування елементів трибосистем. Досягнення критичних значень лінійних розмірів деталей визначається в процесі експлуатації або під час ремонту і вважається відмовою.

Час досягнення поступової відмови розподіляється за нормальним законом, його можна з потрібною ймовірністю оцінити експериментально або методами статистичного розрахунку [9].

Технологіями технічного обслуговування авіаційної техніки передбачено періодичний контроль стану найбільш відповідальних вузлів тертя. Стан поступової відмови виявляється своєчасно, а заміна деталей, вузлів та агрегатів запобігає виникненню аварій і катастрофічних ситуацій. При цьому поступові відмови є основною причиною дострокового зняття та обмеження ресурсу агрегатів; протягом технічного ресурсу планера проводять п'ять і більше капітальних ремонтів із заміною зношених елементів. У результаті вартість технічного обслуговування та ремонтів значно перевищує початкову вартість літаків. Завдання трибології в авіації полягає в тому, щоб збільшити ресурс трибоспряження до ресурсу планера при збереженні рівня технічної безпеки повітряного судна.

Особливість проектування авіаційних трибосистем полягає в тому, що через економію маси не можна зменшувати експлуатаційні навантаження на системи. Проблема збільшення ресурсу та рівня безпеки має вирішуватися шляхом поліпшення внутрішніх властивостей трибосистем.

Безпеку авіаційних трибологічних систем визначають **«раптові» відмови**, коли працездатність відповідальних вузлів втрачається внаслідок заклинювання, аномально великого зношування або пожежі. Такі відмови належать до основних технічних причин інцидентів та **авіаційних подій**.

Складність запобігання таким відмовам полягає в тому, що вони з однаковою ймовірністю можуть виникнути в будь-який момент часу, розвиваються досить швидко та призводять до втрати працездатності на будь-якому етапі польоту.

Головне завдання системи технічного обслуговування та ремонту авіаційної техніки полягає у запобіганні подібному розвитку подій.

Згідно з вимогами Єдиних норм льотної придатності літаків, імовірність виникнення катастрофічної ситуації з технічної причини для повітряного судна в цілому не повинна перевищувати  $10^{-7}$  на годину польоту, тобто не більше однієї події на понад 1100 років польотів [10].

За даними ІКАО, лише 0,01 % відмов призводить до авіаційних подій. Таким чином, тільки одна відмова з десяти тисяч призводить до авіаційних подій, інші усуваються під час технічного обслуговування, близько 1 % відмов локалізуються екіпажем у повітрі.

Досягнення такого рівня безпеки слід віднести до найбільших результатів технічної трибології. Однак в останнє десятиліття рівень технічної безпеки майже не змінюється: поліпшення технічного обслуговування, вдосконалення засобів діагностики та розширення інформаційної бази компенсуються ускладненням і збільшенням кількості систем нових літаків, що впливають на рівень безпеки. Збільшення ресурсу трибоспряжень на порядок при збереженні або навіть підвищенні рівня безпеки неможливе без створення якісних трибологічних систем. Трибологічні системи обмінюються з навколишнім середовищем

енергією, речовиною та інформацією, тому перспективи в цьому напрямі слід пов'язувати з ідеями та методами теорії відкритих систем і нерівноважних процесів.

Основним методом дослідження у трибології, як і в усій класичній науці, є аналіз – розподіл цілого на все дрібніші елементи. Вважається, що тільки глибоко вивчивши всі елементи, можна пізнати явище в цілому.

У трибології такий підхід представлений численними дослідженнями з оцінювання впливу різних факторів на трибопроцеси. Однак спроби об'єднання отриманих результатів у єдине ціле виявлялися невдалими. Основні причини цього полягають у тому, що у відкритих нерівноважних трибосистемах взаємодії факторів є нелінійними, і сумарний вплив не дорівнює сумі окремих впливів.

Крім того, під час реалізації трибопроцесів виникає явище **самоорганізації**, коли в потоках енергії та речовини в контакті утворюються структури **дисипативного типу**, які потім контролюють перебіг процесів. Третя причина полягає в тому, що в нерівноважних системах за певних умов навіть невелика **флуктуація** одного з великої кількості факторів може призвести до катастрофічного результату на виході. Принципово неможливо заздалегідь передбачити момент **біфуркації**, а також перебіг процесу після її виникнення. Наприклад, імовірність раптових відмов з однаковою щільністю розподілена на дуже великих часових інтервалах. Після появи ознак відмови процес може з певною ймовірністю відновитися або ж швидко призвести до повної втрати працездатності. У теорії нерівноважних процесів показана неефективність методів аналізу під час дослідження відкритих систем.

Перевага віддається методам синтезу – реальному або уявному об'єднанню частин у єдине ціле.

У трибології методи синтезу були вперше застосовані під час розв'язання актуальних проблем технічної безпеки та раптових відмов в авіації. Постійне удосконалення системи контролю та діагностики при технічному обслуговуванні, об'єднання всієї інформації про відмови та несправності в єдине ціле, використання методів суб'єктивної логіки та експертних оцінювань дозволили досягти сучасного рівня безпеки. При цьому частка авіаційних подій з технічних причин знизилася з 80 % у тридцять років до 20 % у наш час.

Синтез в інформаційному просторі на базі мільйонів трибоспрямижень і мільярдів годин нальоту дозволив оцінити ймовірність таких надзвичайно рідкісних подій, як поєднання раптових відмов та авіаційних подій.

Було встановлено також, що раптові відмови мають початок, розвиток і кінець, що дозволяє розглядати відмову як процес.

Визначення процесів відмови на ранніх етапах стало одним із основних завдань технічної експлуатації. Вдалося встановити, що більшість авіаційних антифрикційних систем є однорідними щодо невеликої кількості ознак розвитку відмов.

Визначення таких ознак та оцінювання ймовірності відмови при їх появі – надзвичайно складне та відповідальне завдання, оскільки ознака свідчить лише про ймовірність процесу відмови: з певною ймовірністю він може розвиватися або може повернутися в нормальний стаціонарний стан.

Прийняття рішення про дострокову заміну агрегату пов'язане з економічними втратами, а продовження експлуатації – зі зниженням рівня безпеки. Поява ознаки свідчить про досягнення нерівноважною системою точки

біфуркації, подальший розвиток процесу неможливо визначити зі стовідсотковою ймовірністю.

Тому відбувається постійний пошук достовірніших ознак, розвиваються методи підконтрольної експлуатації, а також байєсівський розрахунок за двома, трьома та більше ознаками. Наприклад, стан опор газотурбінних двигунів можна встановити за сукупністю незалежних ознак: віброшвидкості, температури й тиску оливи, акустичної емісії та наявності металевих частинок в оливі.

Причина появи кожної ознаки може бути не пов'язана з опором. Для ідентифікації об'єкта визначають інтегральну ознаку шляхом встановлення логічних зв'язків між одиничними ознаками та динамікою їхньої зміни в часі.

Із розвитком авіації вдосконалюються методи технічної діагностики, а ознаки відмов стають більш точними та чутливими. Наприклад, на етапі розвитку поршневої авіації основною ознакою відмови була наявність на фільтрах металевих частинок видимих розмірів (понад 100 мкм). У газотурбінних двигунах методом фракційного фільтрування проб оливи встановлено, що в нормальному стаціонарному режимі спостерігаються металеві частинки розмірами 0,05...0,08 мкм.

Поява частинок розміром понад 3 мкм свідчить про значну ймовірність розвитку процесу відмови, двигун ставиться на підконтрольну експлуатацію. При подальшому розвитку діагностики як ознаку відмови стали використовувати концентрацію іонів металу в оливі. Магнітометричним методом або методом спектрального аналізу визначають концентрацію металу. При досягненні концентрації заліза або міді 1 г/т двигун ставлять на особливий контроль, при концентрації заліза 4 г/т двигун підлягає достроковому зняттю.

Завдання синтезу при визначенні рівня надійності та безпеки полягає в оцінюванні  $P(E_1|F)$  – ймовірності розвитку процесу відмови при появі ознаки  $F$ , та ймовірності  $P(E_1|0)$  – за відсутності ознаки  $F$ .

Припустимо, що вихід на злітний режим із ймовірністю  $P(E_1)$  спричиняє процес відмови, а з ймовірністю  $P(E_0)$  його не спричиняє.

Нехай діагностична ознака  $F$  із ймовірністю  $P(F|E_1)$  визначає процес відмови, а з ймовірністю  $P(F|E_0)$  дає помилковий діагноз.

Ймовірність розвитку процесу відмови  $P(E_1|F)$  при появі ознаки  $F$  визначається синтетичною формулою Байєса:

$$P(E_1|F) = \frac{P(E_1)P(F|E_1)}{P(F|E_1)P(E_1) + P(F|E_0)P(E_0)}.$$

Ймовірність невиявлення процесу відмови визначається як:

$$P(E_1/0) = \frac{P(E_1)P(0|E_1)}{P(0|E_1)P(E_1) + P(0|E_0)P(E_0)}.$$

Нехай методом експертних оцінювань встановлено, що ознака  $F$  із ймовірністю  $P(F|E_1) = 0,95$  визначає аномальний процес  $E_1$ , а з ймовірністю  $P(E_1|F_0) = 0,05$  – дає помилковий діагноз. Тоді для різних граничних станів за формулою Байєса можна отримати значення ймовірності, наведені нижче у таблиці.

Точність прогнозу багаторазово зростає при одночасному використанні декількох діагностичних ознак.

Наведений приклад показує, як синтез в уявному інформаційному просторі сприяє поліпшенню точності прогнозу, а також підвищенню рівня реальної безпеки технічних систем.

Таблиця 1

**Значення ймовірностей для різних граничних станів**

№ з/п	$P(E_1)$	$P(E_1/F)$	$P(E_1/0)$
1	0,9	0,994	0,32
2	0,75	0,98	0,136
3	0,5	0,95	0,05
4	0,1	0,68	$5,3 \cdot 10^{-3}$
5	0,01	0,16	$5,3 \cdot 10^{-4}$
6	0,001	0,02	$5,3 \cdot 10^{-5}$

**Аналіз і синтез у трибологічному контакті.** Збільшення ресурсу та навантажень на системи в процесі розвитку авіації об'єктивно знижує рівень безпеки. Удосконалення ж методів технічної експлуатації та діагностики, організація інформаційного простору та розроблення нових матеріалів сприяють поліпшенню стану технічної безпеки.

Результат дії двох груп факторів, що взаємодіють, зводиться до того, що ймовірність катастроф із технічних причин в останні десятиліття перебуває на одному рівні. Це означає, що підхід до проблеми, заснований на методах суб'єктивної логіки, які включають експертне оцінювання та байєсівський розрахунок, значною мірою вичерпав себе.

Методи аналізу, в основі яких лежить зв'язок між безліччю факторів і параметрами трибопроцесів, також є малоефективними внаслідок великої кількості впливових факторів, тривалості випробувань на зношування і, тим більше, на відмову.

Створення трибосистем із якісно новими властивостями неможливе без знання внутрішньої структури трибологічного контакту, механізму взаємодії її елементів, можливості керувати цими взаємодіями. Складність таких досліджень полягає в тому, що властивості цих систем виявляються в динаміці, і будь-який датчик, уведений у контакт, одразу ж стає елементом системи й показує власні характеристики.

Крім того, ми маємо справу з процесами, внутрішня структура яких перебуває у широкому просторово-часовому діапазоні. Елементарний акт тертя – утворення та розрив зв'язку між поверхневими атомами тіл, що контактують, – відбувається на інтервалі близько  $10^{-10}$  м протягом приблизно  $10^{-10}$  с при швидкості 1 м/с. При цьому зв'язок здійснює  $10^3$  флуктуацій, що визначаються тепловими коливаннями атомів, утворюється тепло і вноситься внесок у формування сили тертя. Не існує датчиків, щоб розкласти елементарний акт на складові, виміряти сили та потенціали на всіх етапах існування зв'язку. Внутрішні масштаби процесів зношування визначаються флуктуаціями трибоструктур, досягають  $10^{-3} \dots 10^5$  с і реалізуються на шляху тертя  $10^2 \dots 10^6$  м. Катастрофічна ситуація стається не частіше  $10^{10}$  с, відповідний шлях у вузлах тертя –  $10^9 \dots 10^{11}$  м.

Для оцінювання ймовірності поєднання відмови та катастрофи потрібна часова база з багатьох мільйонів годин; лабораторними методами такі характеристики отримати неможливо.

Таким чином, внутрішні просторово-часові масштаби трибологічних процесів – з урахуванням того, що лише одна з десяти тисяч відмов закінчується катастрофою, – розташовуються у просторово-часовому інтервалі понад 16 порядків. При дослідженні настільки різних за масштабами подій виникають труднощі вимірювань та оцінювань, пов'язані з малістю об'єктів дослідження в одному випадку та з надзвичайно великою тривалістю між реалізаціями – в іншому.

Методи синтезу дозволяють розв'язувати проблеми вимірювань та оцінювання подій великих і малих масштабів. Поєднання методів теорії однорідних ансамблів із властивостями ергодичності часових ймовірностей дає можливість представляти подію макроскопічних масштабів, наприклад, силу тертя, як миттєву сумарну силу величезної кількості міжатомних зв'язків трибологічного контакту.

Для оцінювання ймовірності відмови кожного з величезної кількості макроскопічних вузлів тертя методи синтезу дозволяють використовувати всю суттєву інформацію і на базі багатьох мільйонів вузлів тертя та мільярдів годин напрацювання давати статистичні оцінки надзвичайно рідкісним подіям.

При дослідженні тертя трибологічний контакт був представлений ансамблем зв'язків між атомами твердих тіл, що контактують; ці зв'язки компенсують зовнішнє навантаження, а при відносному русі формують трибопроцеси. При швидкості ковзання 1 м/с час існування зв'язку від моменту утворення до розриву становить близько  $10^{-10}$  с. За цей час він проходить усі стани і здійснює близько  $10^3$  флуктуацій, пов'язаних із тепловими коливаннями атомів [9].

Зв'язок являє собою динамічну систему, у якій потенціал  $U(r_0)$  і сила  $F(r_0)$  дорівнюють нулю при міжатомній відстані  $r = r_0$ . При  $r < r_0$  у зв'язку діють кінетичні сили відштовхування, а на відстанях  $r > r_0$  переважають електростатичні сили притягання.

На етапі утворення зв'язку між двома поверхневими атомами їхня надлишкова енергія самочинно перетворюється на енергію теплових коливань і відводиться у тверде тіло, мастильний матеріал та атмосферу. На цьому етапі виникає ентропія. Максимум її виробництва відповідає стаціонарному стану, при цьому коливання атомів у всіх напрямках є приблизно рівноймовірними, а результуюча сила в будь-якому напрямку близька до нуля. У процесі теплопередачі потік теплової енергії не змінюється, а потік ентропії збільшується, доки не досягне максимуму в рівноважному з атмосферою стані. При розриві зв'язку атоми знову стають поверхневими, набуваючи надлишкової енергії, при цьому виконується робота і виникає сила притягання, яка вносить елементарний внесок у силу тертя.

Кількість зв'язків у трибологічному контакті становить близько від загальної кількості атомів, тобто вони розділені десятками й сотнями міжатомних відстаней. Кінетичні сили відштовхування діють перпендикулярно до контакту, а сили тертя за відсутності найближчих сусідів формують універсальні сили електричного притягання; сумарна міцність зв'язків при цьому близька до теоретичної. Сила тертя дорівнює миттєвій сумарній силі притягання всіх зв'язків між атомами тіл, що контактують, яка діє в напрямку тертя. Її можна представити у вигляді синтетичної формули:

$$F_{\text{тр}} = \frac{NP}{D} \int_{r_1}^{r_2} F(r) P(r) dr, \quad (1)$$

де  $N$  – кількість атомів на одиниці площі трибоконтакту;  $P$  – навантаження;  $D$  – об'ємний модуль пружності;  $F(r) = dU/dr$  – сила зв'язку в стані  $r$ ;  $r$  – міжатомний стан. Вираз перед інтегралом визначає кількість зв'язків у контакті, під інтегралом – середню за флуктуацію силу зв'язку, тобто сила тертя дорівнює узагальненому миттєвому градієнту контактного потенціалу в напрямку тертя.

Якщо прийняти як наближене значення інтеграла в рівнянні (1)  $F(r_0)$  – силу електростатичного притягання на міжатомній відстані, то за цією формулою отримаємо розрахункові значення сили тертя за порядком величин, близьких до реальних значень. Тобто запропонована модель у вигляді ансамблю міжатомних зв'язків і метод синтезу у вигляді формули (1) із достатнім ступенем адекватності відображають реальний синтез при міжатомних взаємодіях у трибологічному контакті щодо діючих сил та енергії.

Обмін зв'язками в трибологічному контакті обов'язково супроводжується перенесенням речовини. При координаційному числі кристалічної решітки, що дорівнює 12, поверхневі атоми мають із решіткою від 1 до 11 зв'язків. Розірвані зв'язки формують надлишкову поверхневу енергію, а при зближенні твердих тіл утворюють зв'язки з атомами контрзразка та мастильного матеріалу. Якщо кількість зв'язків із контрзразком перевищує кількість зв'язків із основою, то атом переноситься на іншу поверхню. Таким чином відбувається безперервне перенесення атомів між поверхнями та їхня фізико-хімічна взаємодія з атомами контрзразка та мастильного матеріалу.

Величезний досвід експлуатації антифрикційних систем, вивчення поверхонь тертя, продуктів зношування, складу мастильних олив свідчать про те, що в трибологічному контакті відбувається багатоетапний синтез.

В ізольованих системах стійкими є рівноважні стани, що відповідають максимуму ентропії або мінімуму вільної енергії. У відкритих трибологічних системах, які обмінюються з навколишнім середовищем енергією, речовиною та інформацією, стійкими є стаціонарні стани, що визначаються граничними умовами. У трибології граничні умови задають швидкість і навантаження – точку у двовимірному просторі швидкостей і навантажень, яким відповідає певне значення стаціонарних характеристик тертя, зношування та відмови. Стаціонарні стани формуються на еволюційному етапі припрацювання, коли система самочинно переходить зі стану, що задається технологією, у стан, що визначається самим процесом. На цьому етапі в контакті формуються трибологічні структури, у яких потім у стаціонарному режимі реалізуються трибопроцеси. Трибоструктури формуються з продуктів взаємодії речовини всіх елементів трибосистеми, що перебувають у кінцевому фізико-хімічному та агрегатному стані. Оксиди, сульфіді, фосфати, кокси, металоорганічні солі та комплекси у вигляді молекул, кластерів і ультрадисперсних частинок є елементами трибоструктур і забезпечують їхню стійкість до зовнішніх впливів. Поведінка трибоструктур залежить від енергії та її розподілу між вільною енергією та ентропією, яка прагне до максимуму, тобто до рівномірного розподілу, що сприяє руйнуванню структури.

Основну роль у механізмі формування трибоструктур відіграє випадковість. У флуктуючому потенціальному полі трибологічного контакту випадковим

чином виникають піки ймовірності. В умовах еволюційного процесу найслабшим пікам ймовірності потенціалу відповідають різкі піки концентрації речовини, що переноситься [11]. Кінцеві молекули, кластери, ультрадисперсні частинки утворюють структури у вигляді окремих ділянок, сіток, комірок, клино- та хвилеподібних систем, які можна безпосередньо спостерігати після завершення процесу на поверхнях тертя деталей, зразків та досліджувати в метастабільному стані. Зменшення ентропії при утворенні трибоструктур багаторазово компенсується зростанням ентропії в процесі відведення тепла з трибосистеми. Такі умови є сприятливими для самоорганізації та утворення дисипативних структур [12].

Сформувавшись, трибоструктури функціонують у стаціонарному режимі за нелінійними законами синергетики. Їхнє надмірне зростання обмежене ентропією, а нижній рівень – вільною енергією. Skorиставшись лінійним наближенням рівняння перенесення Больцмана, можна представити трибопроцеси як функції часу у такому вигляді:

$$\frac{dy(t)}{dt} = -\frac{y_0 - \langle y \rangle}{T}; \quad (2)$$

$$Y(t) = (y_0 - \langle y \rangle) \exp(-t/T) + \langle y \rangle; \quad (3)$$

$$Y(t) = (y_0 - \langle y \rangle) T [1 - \exp(-t/T)] + \langle y \rangle t, \quad (4)$$

де  $y_0$  і  $\langle y \rangle$  – початкове та середнє стаціонарне значення процесу;  $T$  – час релаксації припрацювання;  $Y(t)$  – інтегральний процес. Замінивши в рівняннях (2) – (4) час  $t$  на шлях тертя  $l$ , отримаємо просторове представлення процесів. Шлях тертя є для трибопроцесів аналогом часу, а також виконує функції простору; робота тертя дорівнює силі тертя, помноженій на шлях.

Якщо замість часу тертя  $t$  використовувати його трибологічний аналог – шлях тертя  $l$ , то процесу тертя відповідають енергія  $E_{тр}(l)$  і сила тертя  $F(l) = dE(l)/dl$ ; процесу зношування – знос  $I(l)$  та інтенсивність зношування  $i(l) = dI(l)/dl$ ; **процесу відмови – ймовірність відмови**  $Q(l)$  та інтенсивність відмов  $P(l) = dQ(l)/dl$ .

Експоненти в правій частині рівнянь (3) та (4) описують еволюційний процес припрацювання, при цьому тривалість припрацювання оцінює час релаксації  $T$ , а внесок припрацювання в інтегральний процес – функціонал  $Y_0 = (y_0 - \langle y \rangle) T [1 - \exp(-t/T)]$ . На цьому етапі переважає прагнення вільної енергії до мінімуму; відбувається агрегація частинок, що переносяться, внутрішні потоки речовини спрямовані на формування трибоструктури та збільшення її об'єму, потік речовини із системи зменшується, доки не досягне стаціонарного стану.

Речовина трибоструктури при цьому перебуває в кінцевому фізико-хімічному та агрегатному стані, екстенсивна величина ентропії трибоструктури пропорційна її об'єму. Зі збільшенням об'єму зростає й ентропія трибоструктури; коли її вплив стає переважаючим, структура втрачає стійкість. Прагнення до рівномірного розподілу призводить до часткового руйнування трибоструктури та винесення певної кількості її речовини із системи у вигляді продуктів зношування. Об'єм та ентропія трибоструктури при цьому зменшуються, переважаючим стає прагнення вільної енергії до мінімуму, відбувається синтез

кінцевих продуктів і приєднання частинок, що утворилися, до трибоструктури. Об'єм та ентропія структури зростають, і цикл повторюється.

У кінцевій речовині, що формує трибоструктуру, кожна складова трибосистеми представлена в певній концентрації. Процес зношування – зміна лінійних розмірів твердих тіл  $I(t)$  – прямо пов'язаний з участю їхньої речовини у формуванні трибоструктур; потік цієї речовини, усереднений за площею контакту, дорівнює швидкості зношування  $I(t) = dI(t)/dt$ . У стаціонарному стані це процеси з постійними середніми значеннями та дисперсіями. Стійкість процесів забезпечується конкуренцією вільної енергії та ентропії, при цьому друга похідна  $d^2I/dt^2$  є протилежною за знаком до відхилення  $I(t)$  від середнього значення. Саме ж середнє значення є точкою перегину функції, у якій вільна енергія та ентропія змінюються місцями за ступенем впливу на процес.

Рівень стаціонарного стану визначає не вся вироблена ентропія, а тільки та її мала частина, що пов'язана з речовиною трибоструктури; вона пропорційна об'єму і може як збільшуватися, так і зменшуватися, тоді як повна ентропія в процесі тертя завжди зростає. Конкуренція вільної енергії  $G$  та ентропії  $S$  породжує в далеких від рівноваги умовах стійкі періодичні процеси. У координатах  $G - S$  таким процесам відповідають модель Лотки–Вольтерри, бруселятор тощо.

Якщо трибоструктура відновлюється на часовому інтервалі  $\tau$ , то знос  $I(t)$  на цьому інтервалі можна розглядати як незалежну величину. Тоді, згідно з центральною граничною теоремою, при  $t \gg \tau$ , знос має нормальний розподіл, який можна представити у вигляді:

$$I(t) = \langle i \rangle t \pm \eta \sigma t (t/\tau)^{1/2}; \quad (5)$$

$$\langle i \rangle = \frac{I(t)}{t} \pm \eta \sigma \left(\frac{t}{\tau}\right)^{-1/2}, \quad (6)$$

де  $\langle i \rangle$  – середнє значення стаціонарного процесу;  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення;  $\eta$  – гаусівська величина з одиничною дисперсією.

Ентропія в процесі тертя завжди зростає.

Дисперсія інтегрального процесу пропорційна  $t/\tau$ , а дисперсія середнього значення стаціонарного процесу –  $(t/\tau)^{-1}$ . Простою заміною у рівняннях (5) і (6)  $t$  на одиницю можна отримати вираз процесів за шляхом тертя.

На еволюційному етапі приробітку переважає вплив енергії; у трибологічному контакті молекули, кластери, ультрадисперсні частинки об'єднуються в трибоструктури.

Зі зростанням об'єму трибоструктур посилюється вплив ентропійного фактора, аж поки не відбудеться часткове руйнування трибоструктури й певна кількість речовини не вийде із системи у вигляді продуктів зносу. Після цього переважним стає вплив енергії, відбувається синтез і трибоструктура відновлюється. Конкуренція аналізу та синтезу, а також стабілізувальний вплив потоків енергії та речовини призводять до стійкого стаціонарного процесу, який флюктує навколо середнього значення зі сталою дисперсією.

Головний результат теорії нерівноважних процесів полягає в тому, що стійкості стаціонарних станів можуть загрозувати лише автокаталітичні реакції, коли продукти реакції беруть участь у її розвитку. Стійкості стаціонарних трибопроцесів завжди загрожують "раптові" відмови. Автокаталітичні механізми таких відмов можна представити наступним чином. Трибологічні структури в

антифрикційних системах завжди флюктуують у стаціонарному режимі від мінімального до максимального об'єму. На мінімальному рівні відбувається безпосередня взаємодія виступів твердих тіл, що супроводжується стрибками тиску та температури. Найбільш імовірний результат таких взаємодій полягає у збільшенні швидкості синтезу кінцевих продуктів і відновленні трибоструктури. Однак існує ймовірність іншого результату, коли при взаємодії відбувається відділення великих часток твердих тіл. Такі частки викликають перенапруження в контакті та відділення нових часток, процес розвивається за автокаталітичним механізмом, що призводить до незворотного руйнування трибоструктури та відмови. З цієї причини наявність металевих часток у продуктах зносу з достатньою ймовірністю свідчить про розвиток процесу відмови.

Внутрішніми джерелами речовини при синтезі трибоструктур є елементи трибосистеми: тверді тіла та мастило. Речовина твердих тіл, беручи участь у трибопроцесі, формує знос.

В антифрикційних системах граничні умови визначає точка у просторі швидкостей навантажень. Кожній такій точці відповідає стійкий стаціонарний стан; потоки енергії, речовини та відмов мають сталі середні значення і дисперсію. У деяких трибологічних системах реалізується ефект беззношуваності, коли тверді тіла виконують роль каталізатора, а самі не витрачаються в процесі. Наприклад, у вузлах тертя деяких холодильних агрегатів трибоструктури формуються з іонів міді, що містяться в холодоагенті, внаслідок розчинення підвідних мідних трубок. При цьому в системі «трибоструктура – холодоагент – мідні трубки» реалізується стаціонарний процес типу «білий шум» з нульовим середнім і сталою дисперсією, внутрішнє джерело речовини відсутнє, а деталі трибоспряження виконують функції каталізатора. Інтеграл за часом від цього процесу – це процес Вінера з нульовим середнім і дисперсією, пропорційною часу.

Розміри деталей після 10, 15 і 20 років експлуатації холодильників перебували в межах трибологічних допусків.

Подібний ефект беззношуваності спостерігається у здорових біологічних трибосистемах, коли потоки речовини, що виходять із суглобів, компенсуються речовиною, яка надходить через капіляри кровоносної та кісткової систем.

**Висновки.** Результати дослідження свідчать про те, що трибологічні процеси в антифрикційних системах являють собою стаціонарну конкуренцію аналізу й синтезу, руйнування та об'єднання.

Стаціонарний стан формується на етапі припрацювання, його рівень визначається властивостями трибосистеми, а також граничними умовами – точкою осі в просторі швидкостей і навантажень. У моделі трибологічного контакту у вигляді ансамблю однорідних міжатомних зв'язків аналіз відбувається на етапі самовільного утворення зв'язку; при цьому надлишкова поверхнева енергія розкладається на множину теплових фонів, процес контролюється ентропією, а результуючі сили в будь-якому напрямку близькі до нуля.

На етапі розриву зв'язку атоми набувають поверхневої енергії, при цьому виконується робота в напрямку руху проти сил електростатичного притягання. Сила тертя – це миттєвий синтез сил усіх зв'язків трибологічного контакту.

У процесі припрацювання здійснюється багатоступеневий синтез, під час якого утворюються молекули, кластери та ультрадисперсні частинки кінцевих продуктів.

У потоках енергії та речовини ці частинки самоорганізуються в трибоструктури дисипативного типу, які функціонують у стійкому стаціонарному режимі під конкуруючим впливом енергії та ентропії. Надлишок ентропії призводить до часткового руйнування трибоструктури, а її нестача – сприяє відновленню трибоструктури. У разі необоротного руйнування трибоструктури розвивається процес відмови. Надзвичайно мала допустима ймовірність відмови в авіації ініціювала розвиток синтезу в мисленнєвому, інформаційному просторі.

Створення інформаційної бази, застосування методів суб'єктивної логіки та байєсівські розрахунки дали змогу досягти сучасного рівня технічної безпеки в авіації.

### Список літератури

1. Костецький Б. І., Носовський І. Г., Караульов А. К. та ін. Поверхнева міцність матеріалів при терті. Київ: Техніка, 1976. 296 с.
2. Марчук В. Є., Кудрін А. П., Духота О. І. Вплив параметрів дискретно-лункових поверхонь контакту на фретингостійкість конструкційної сталі в умовах граничного мащення. Проблеми тертя та зношування. 2012. № 58. С. 58-64.
3. Шевеля В. В., Орлович В. О., Кирилюк В. О., Федина В. П. Дисипативні властивості та фретингостійкість пластичних мастил. Проблеми трибології. 2007. № 13. С. 55-66.
4. Zhu Y., Wang Q.J. Boundary lubrication by adsorption film // *Friction*. 2015. Vol. 3, No. 1. P. 27–46.
5. Дмитриченко М. Ф., Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. О. Триботехніка та основи надійності машин: навч. посіб. Київ: ІНФОРМАВТОДОР, 2006. 216 с.
6. Kindrachuk M. V., Dushek Yu. Ya., Luchka M. V., Gladchenko A. N. Evolution of the structure and properties of eutectic coatings during friction. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 1995. Vol. 34, No. 5–6. P. 321-326. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00560139>
7. Mitchell M. *Complexity: A Guided Tour*. Oxford: Oxford University Press, 2009. 368 p.
8. Ayyub B.M., Klir G.J. *Probabilistic Methods for Aerospace Vehicle Safety*. Reston: AIAA, 2006. 512 p.
9. Кульгавий Е. А. Триботехнічні характеристики та їх застосування // Проблеми трибології. - 2003. - № 3. - С. 51 - 61.
10. Stolzer A.J., Halford C.D., Goglia J.J. *Safety Management Systems in Aviation*. London: Routledge, 2016. 428 p.
11. Frenkel Ya.I. Introduction to the theory of metals [Vvedenie v teoriyu metallov]. Moscow: Fizmatgiz, 1972. 368 p.
12. Frisch U., Bec J. Intermittency in Turbulent Flows // *Les Houches Lecture Series*. 2001. Vol. 74. P. 341–383.

Отримано: 28 квітня 2026

Прийнято: 10 травня 2026

Опубліковано: 31 травня 2026

**Кіндрачук Мирослав Васильович** – член-корреспондент Національної академії наук України, докт. техн. наук, професор, професор кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Державний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел/факс: +38(044)4067773, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-0529-2466>.

---

**Корнієнко Анатолій Олександрович** – канд. техн. наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Державний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, <https://orcid.org/0000-0002-7108-3152>

**Стебелецька Наталія Миронівна** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри прикладної механіки та технічного сервісу, Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут», Тернопільська область, м. Бережани, вул. Академічна, 20, 47501, E-mail: [stebeletska@ukr.net](mailto:stebeletska@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-2726-0932>.

**Гуменюк Ігор Анатолійович** – канд. техн. наук, директор департаменту АТ «Укртелеком», б-р Шевченка, 18, м. Київ, Україна, 01601, <https://orcid.org/0000-0002-4352-7035>

**Харченко Володимир Володимирович** – завідувач лабораторії кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Державний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, +38(044)4067773, E-mail: [nau12@ukr.net](mailto:nau12@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0001-6383-5337>

**Гловин Андрій Леонідович** – старший викладач кафедри автомобільного транспорту, Відокремлений структурний підрозділ «Бережанський фаховий коледж Національного університету біоресурсів і природокористування України», вул. Академічна, 20, м. Бережани, Тернопільська область, 47501, E-mail: [glovin@ukr.net](mailto:glovin@ukr.net), <https://orcid.org/0009-0004-6164-8940>

**Федорчук Світлана Володимирівна** – старший викладач кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Державний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: [svitlana.fedorchuk@npp.kai.edu.ua](mailto:svitlana.fedorchuk@npp.kai.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0002-5836-9674>

M. KINDRACHUK, A. KORNIENKO, N. STEBELETSKA, I. HUMENYUK, V. KHARCHENKO, A. HLOVYN, S. FEDORCHUK

### ANALYSIS AND SYNTHESIS IN AVIATION TRIBOLOGICAL SYSTEMS

This paper examines current issues in tribology within aviation systems in the context of improving technical safety and extending the service life of friction components. The limitations of traditional analytical methods in the study of complex open non-equilibrium systems are identified, and the feasibility of combining methods of analysis and synthesis to generalize multifactorial processes of friction, wear, and failure is substantiated. The formation of tribological contact at the microlevel is analyzed, where friction is considered as a result of the dynamics of interatomic bonds. The role of self-organization processes and the formation of tribostructures in ensuring steady-state operating modes of tribosystems is revealed. It is shown that the stability of such modes is determined by the dynamic equilibrium between energy and mass flows and the increase in entropy. The nature of gradual and sudden failures has been investigated, in particular the autocatalytic mechanisms of tribostructure destruction. The application of probabilistic methods, in particular Bayesian analysis, has been justified to improve the reliability of diagnosing the technical condition of friction units and assessing the risk of rare failures. The comprehensive use of synthesis methods, the development of intelligent diagnostic systems, and a deeper understanding of the internal structure of tribological processes are considered a priority direction for improving the reliability of aviation tribosystems.

**Keywords:** friction, tribological contact, tribostructures, non-equilibrium systems, methods of analysis and synthesis, entropy, wear, sudden failures, thermodynamics of nonequilibrium processes, reliability.

### References

1. Kosteckij B. I., Nosovskij I. G., Karaulov A. K. ta in. Poverhneva micnist materialiv pri terti. Kiyiv: Tehnika, 1976. 296 s.
2. Marchuk V. Ye., Kudrin A. P., Duhota O. I. Vpliv parametriv diskretno-lunkovih poverhon kontaktu na fretingostijkist konstrukcijnoyi stali v umovah granichnogo mashhennya. Problemi tertya ta znoshuvannya. 2012. № 58. S. 58-64.
3. Shevelia V. V., Orlovykh V. O., Kyrlyuk V. O., Fedyna V. P. Dysypatyvni vlasty-vosti ta fretynhostiikist plastychnykh mastyl. Problemy trybolohii. 2007. № 13. S. 55-66.
4. Zhu Y., Wang Q.J. Boundary lubrication by adsorption film // *Friction*. 2015. Vol. 3, No. 1. P. 27-46.
5. Dmytrychenko M. F., Mnatsakanov R. H., Mikosianchyk O. O. Trybotekhnika ta osnovy nadiinosti mashyn: navch. posib. Kyiv: INFORMA VTODOR, 2006. 216 s.
6. Kindrachuk M. V., Dushek Yu. Ya., Luchka M. V., Gladchenko A. N. Evolution of the structure and properties of eutectic coatings during friction. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 1995. Vol. 34, No. 5-6. P. 321-326. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00560139>
7. Mitchell M. *Complexity: A Guided Tour*. Oxford: Oxford University Press, 2009. 368 p.
8. Ayyub B.M., Klir G.J. *Probabilistic Methods for Aerospace Vehicle Safety*. Reston: AIAA, 2006. 512 p.
9. Kulhavyi E. A. Trybotekhnichni kharakterystyky ta yikh zastosuvannya // *Problemy trybolohii*. - 2003. - № 3. - S. 51 - 61.
10. Stolzer A.J., Halford C.D., Goglia J.J. *Safety Management Systems in Aviation*. London: Routledge, 2016. 428 p.
11. Frenkel Ya.I. Introduction to the theory of metals [Vvedenie v teoriyu metallov]. Moscow: Fizmatgiz, 1972. 368 p.
12. Frisch U., Bec J. Intermittency in Turbulent Flows // *Les Houches Lecture Series*. 2001. Vol. 74. P. 341-383.

---

**Myroslav Kindrachuk** – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, State University "Kyiv Aviation Institute", 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-0529-2466>

**Anatolii Kornienko** - PhD, senior researcher, associate professor of Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, State University "Kyiv Aviation Institute", 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, <https://orcid.org/0000-0002-7108-3152>

**Nataliia Stebeletska** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Applied Mechanics and Technical Service Separate subdivision of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine "Berezhany Agrotechnical Institute", 20 Akademichna Str., Berezhany, Ukraine, 47501, E-mail: [stebeletska@ukr.net](mailto:stebeletska@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-2726-0932>.

**Ihor Humenyuk** – Candidate of Technical Sciences, Director of the Department at Ukrtelecom, 18 Tarasa Shevchenka Blvd., Kyiv, 01601, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-4352-7035>

**Volodymyr Kharchenko** – head of laboratory of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, State University "Kyiv Aviation Institute", 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6383-5337>

**Andrii Hlovyn** – Senior Lecturer at the Department of Automobile Transport of the Separate structural subdivision "Berezhany Vocational College National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine", Ternopil region, Berezhany, 20 Akademichna Str., 47501, E-mail: [glovyn@ukr.net](mailto:glovyn@ukr.net), <https://orcid.org/0009-0004-6164-8940>

**Svitlana Fedorchuk** – Senior Lecturer of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, State University "Kyiv Aviation Institute", 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: svitlana.fedorchuk@npp.kai.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-5836-9674>