

УДК 656.7.01:62.001.7 (043.2)

ОСОБЛИВОСТІ ПОРІВНЯЛЬНОЇ ОЦІНКИ ВАРІАНТІВ МОДЕРНІЗАЦІЇ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

О. В. Самков, А. С. Височанський, С. Ю. Качур, О. В. Корнієнко

Національний авіаційний університет

int2080@ukr.net

Запропоновано метод аналізу ієрархій та на його основі розроблено алгоритм (методика) порівняльної оцінки і вибору варіантів модернізації авіаційної техніки для розв'язання задачі з порівняння і вибору кращого зразка авіаційного комплексу

The method of hierarchies' analysis has been offered for the purpose of selection the best sample of aviation complex. Based on this method the algorithm of comparative estimation and selection of versions for aeronautical engineering upgrade has been developed.

Постановка проблеми

В умовах значної кількості зразків авіаційної техніки (АТ), що пропонуються на світовому ринку, постає завдання проведення їх порівняльної оцінки і вибору кращого зразка, який відповідає критерію «ефективність—вартість». Від результатів вибору зразків АТ залежать сумарна ефективності парку АТ та обсяги фінансових витрат на їх придбання й експлуатацію. Помилкові розв'язання на цьому етапі, з урахуванням високої вартості сучасної АТ, призведуть до великих необґрунтованих затрат, а також до невідповідностей вибраної техніки вимогам експлуатанта.

В умовах багатокритеріальності споживачу практично неможливо зробити обґрунтований вибір того чи іншого зразка АТ, який би максимально задовольняв вимоги експлуатанта, а також мав помірну вартість. Методичний апарат, який би дав змогу ефективно розв'язувати задачу порівняльної оцінки і вибору кращих зразків АТ, поки не існує, що і визначає її актуальність в сучасних умовах.

Для розв'язання задачі вибору складних технічних систем (СТС) за критерієм «ефективність—вартість» запропоновано ряд підходів, які достатньо повно описані в працях [1—3]. Проте вони більшою мірою мають обмеження на кількість показників і критеріїв та ґрунтуються на емпіричних експертних оцінках, у яких наявні суб'єктивні помилки. Такі недоліки не дають змогу приймати відповідне розв'язання з вибору кращого варіанта АТ з необхідним рівнем достовірності.

У зв'язку з цим, для порівняльної оцінки і вибору кращих зразків АТ за критерієм «ефективність—вартість» необхідно запропонувати метод та розробити алгоритм (методику) її розв'язання. Така задача може розв'язуватися як для нових існуючих зразків АТ, так і в процесі їх створення (модернізації).

Аналіз досліджень

Аналіз досліджень показує, що ряд методичних підходів [1—3], які використовуються для порівняльної оцінки і вибору кращих зразків

СТС, можуть бути запропоновані й для АТ з урахуванням відповідного комплексу параметрів та критеріїв а саме:

1. Метод аналітичних ієрархічних процесів (АІП) або метод аналізу ієрархій (МАІ). Багатокритеріальний метод прийняття рішень, який використовує ієрархічну чи мережеву структуру представлення задачі прийняття розв'язання і визначення пріоритетів альтернативних варіантів на основі суджень особи, яка приймає розв'язання (ОПР).

2. Метод простого зважування, який ґрунтується на визначення ОПР ваг важливості критеріїв.

3. Метод ідеальної точки. Ґрунтується на твердженні, що найкраще розв'язання має найменшу відстань до позитивно-ідеального розв'язання і найбільшу відстань до негативно-ідеального розв'язання.

4. Метод ЕЛЕКТРА. Метод полягає в такому, що, якщо навіть альтернатива А не домінує над альтернативою В, то ОПР може розглядати альтернативу А кращою за В. Результати досліджень з вибору методу розв'язання задачі дали змогу вибрати метод аналізу ієрархій, який найбільш відповідає її вимогам.

Мета

Виходячи з задачі, яка сформульована, а також запропонованого методу її розв'язання, метою цієї статті є розробка алгоритму (методики) порівняльної оцінки варіантів модернізації АТ на основі МАІ.

Основна частина

Одним з наукових положень, які обрані для розв'язання задачі та досягнення мети, є розгляд АТ з позицій системного підходу, за якого порівнюються авіаційні комплекси (АК) у цілому.

У склад АК входять такі його основні компоненти, як літальний апарат (ЛА), засоби технічного обслуговування, аеродромно-технічні засоби, засоби зв'язку, управління тощо. Інші підходи, які не розглядають під час порівняння та вибору варіантів модернізації всі компоненти АК, призводять до значних помилок.

Метод аналізу ієрархій, на якому запропоновано проводити порівняльну оцінку та вибір варіантів модернізації АК, був розроблений американським ученим Т. Сааті [2]. Цей метод належить до багатокритеріальних методів досліджень, який ґрунтується на створенні ієрархічної структури та оцінювання ступеня впливу факторів нижнього рівня ієрархії (об'єкти) на кінцеву ціль.

Для розв'язання поставленого завдання запропоновано чотирирівневу ієрархічну структуру, що розглядає на першому рівні об'єкти дослідження; на другому — показники та критерії; на третьому — інтегральні критерії (ІК); на четвертому — ціль (бажаний результат).

Основними вимогами до показників і критеріїв, а також до ІК є [1]:

— визначення основних властивостей зразка порівняння;

— порівняння однотипних, а за необхідності і різнотипних зразків порівняння;

— оцінювання впливів окремих факторів на зразок у цілому;

— бути простим та зручним при застосуванні.

Основними етапами алгоритму проведення порівняльної оцінки та вибору варіантів модернізації АК за допомогою МАІ є:

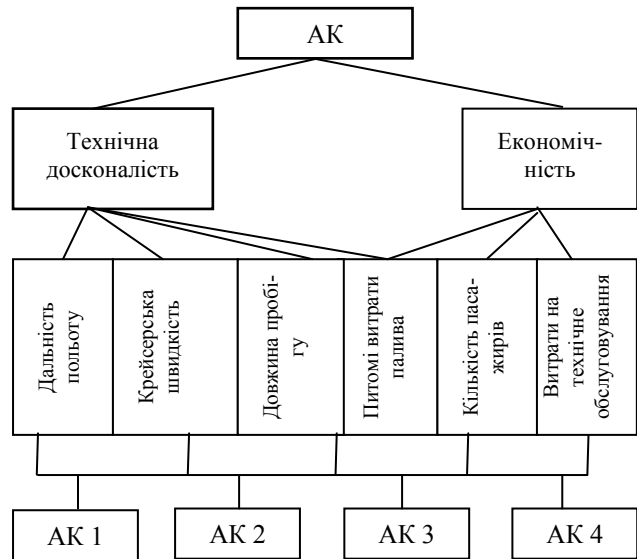
1. вибір показників та ІК;
2. структуризація задачі порівняння та вибору;
3. проведення попарного порівняння показників;
4. обчислення векторів пріоритетів нижчих рівнів;
5. обчислення глобальних пріоритетів та вибір кращих зразків модернізованих АК.

Апробацію розв'язання задачі порівняльної оцінки та вибору варіантів модернізації АК проведемо на прикладі, де порівнюються чотири варіанти модернізації АК за шістьма показниками: дальністю польоту — П1; крейсерською швидкістю — П2; довжиною пробігу — П3; питомими витратами палива — П4; кількістю пасажирів (вантажу) — П5; витратами на технічне обслуговування — П6.

Етап 1. Вибір показників та ІК. Цей етап є одним з найважливіших під час проведення досліджень, від якого залежить його результат. Перелік показників порівняльної оцінки та вибору варіантів модернізації АК залежить в першу чергу від призначення АК та умов його застосування, задач, які він розв'язує, та кількісних і якісних вимог до його роботи.

Процедура обґрунтування показників АК для порівняння, як правило, ґрунтується на застосуванні методів експертного опитування, математичного моделювання, планування експериментів та регресійного аналізу. Для апробації нашого алгоритму (методики) за інтегральні критерії обрані технічна досконалість та економічність, а за показники — П1...П6.

Етап 2. Встановлюються взаємозв'язки між об'єктами, показниками, ІК та ціллю та складається структурна схема (див. рисунок).



Структурна схема чотирирівневої ієрархічної структури для задачі вибору АК

Попередньо розраховані значення вищенаведених локальних показників наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Оцінювальні показники порівнюваних авіаційних комплексів

АКі	Оцінювальні показники					
	П1, км	П2, км/год	П3, км	П4, кг/Н·ч	П5, од.	П6, млн грн
1	4100	800	1,8	2,3	120	0,6
2	2500	880	2,8	1,8	96	0,7
3	5000	903	2	2,4	150	0,75
4	4620	950	1,8	2,6	108	0,9

Етап 3. Проведення попарного порівняння показників на основі суджень експертів з урахуванням визначення інтенсивності впливу показників на ІК, проводиться за допомогою дев'ятибальної шкали порівнянь альтернатив (табл. 2) [2].

Таблиця 2

Шкала порівнянь альтернатив

Інтенсивність відносної важливості	Визначення
1	Рівна важливість показників
3	Помірна перевага одного над іншим
5	Сильна перевага
7	Значно сильна перевага
9	Абсолютно сильна перевага

2, 4, 6, 8	Проміжні судження
------------	-------------------

Один і той самий одиничний показник може мати різну інтенсивність впливу на різні ІК. Порівняння проводяться таким чином: якщо П2 значно переважає П4, то елементу таблиці з координатою 2:4 присвоюється значення 7, а у разі порівняння П4 з П2 елементу таблиці з координатою 4:2 присвоюється обернене значення.

Попарно порівнявши показники для рівня 3, за допомогою вищезазначеної шкали вносимо дані до табл. 3 та 4.

Таблиця 3

Матриця попарних порівнянь показників відносно інтегрованого критерію «технічна досконалість»

Показник	П1	П2	П3	П4
П1	1	1/3	4	6
П2	1/3	1	5	7
П3	1/4	1/5	1	3
П4	1/6	1/7	1/3	1

Таблиця 4

Матриця попарних порівнянь показників відносно інтегрованого критерію «економічність»

Показник	П4	П5	П6
П4	1	1/5	3
П5	5	1	7
П6	1/3	1/7	1

На основі проведення попарного порівняння оцінювальних показників АК (П1...П6) отримуємо шість матриць розмірністю 4x4, окремо для кожного показника.

Вектори локальних та оцінювальних пріоритетів обчислюються за формулами:

$$B_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n A_{ij}}, \quad i = \overline{1; n}, \quad (1)$$

де B_i — елемент вектора пріоритету за рядком; A_{ij} — елемент квадратної матриці з розрядністю n ; n — кількість показників, які порівнюються:

$$P_i = \frac{B_i}{\sum_{j=1}^n B_j}, \quad i = \overline{1; n}, \quad (2)$$

де P_i — елемент нормалізованого вектора пріоритету.

Етап 4. З групи матриць парних порівнянь формується набір локальних пріоритетів, що виражають відносний вплив множини елементів на елемент верхнього рівня. Для цього обчислюється власний вектор для кожної матриці, що відповідає найбільшому власному числу, а потім нор-

малізується результат до одиниці. Таким чином, одержуємо вектор пріоритетів. Знаходження вектора пріоритетів проводимо за допомогою методу середнього геометричного [1].

Вектори пріоритетів для 2 та 3 рівнів наведено в табл. 5 та 6.

Таблиця 5

Вектори пріоритетів для інтегрованого критерію «технічна досконалість»

Показник	П1	П2	П3	П4	
Вектор пріоритету	0,29	0,55	0,11	0,05	
Пріоритети АК за кожним показником	АК1	0,23	0,25	0,21	0,25
	АК2	0,25	0,15	0,33	0,20
	АК3	0,26	0,31	0,24	0,26
	АК4	0,27	0,29	0,21	0,29

Таблиця 6

Вектори пріоритетів для інтегрованого критерію «економічність»

Показник	П4	П5	П6	
Вектор пріоритетів	0,19	0,73	0,08	
Пріоритети АК за кожним показником	АК1	0,25	0,225	0,20
	АК2	0,20	0,20	0,24
	АК3	0,26	0,32	0,26
	АК4	0,29	0,23	0,31

Етап 5. Тепер знаходимо глобальні пріоритети для ІК.

Вектор глобальних пріоритетів обчислюється за формулою:

$$K_i = \sum_{j=1}^m P_i \times PO_j, \quad i = \overline{1; n}, \quad (3)$$

де K_i — елемент вектора глобальних пріоритетів; P_i — елемент вектора локальних пріоритетів; PO_j — елемент вектора оцінювальних пріоритетів; m — кількість оцінювальних пріоритетів; n — кількість локальних пріоритетів.

Глобальний пріоритет АК знаходиться як сума добутків локальних пріоритетів на пріоритет відповідного показника (табл. 7).

Таблиця 7

Глобальні пріоритети

АК	Глобальний пріоритет для ІК «технічна досконалість»	Глобальний пріоритет для ІК «економічність»
1	0,241	0,249
2	0,203	0,205
3	0,283	0,301

4	0,273	0,245
---	-------	-------

Для досягнення кінцевої мети необхідно визначити, як впливають ІК на кінцевий результат.

Значення пріоритету, які розраховані на основі виразів (1—4) АК буде обчислюватись як сума добутку коефіцієнта впливу і відповідного глобального пріоритету. Визначення пріоритетів першого рівня:

$$L_i = \sum_{j=1}^n K_j \times \alpha_j, \quad i = \overline{1; m}, \quad (4)$$

де K_j — глобальний пріоритет; α_j — коефіцієнт впливу j -го ІК на рівень 1; m — порівнювальні АК; n — кількість ІК.

Припустимо, що ІК рівноцінні, тобто коефіцієнти впливу становлять 0,5. Тоді значення вектора пріоритету набудуть вигляду, наведеного в табл. 8. Кращим буде той варіант модернізації АК, який має найбільше значення серед цього вектора.

Таблиця 8

Вектор пріоритету

Вектор пріоритету АК	Глобальний пріоритет для ІК «технічна досконалість»
1	0,245
2	0,204
3	0,292
4	0,259

З наведених результатів видно, що АК 3 є найкращим зразком із запропонованих варіантів.

Висновки

Запропоновано метод аналізу ієрархій та на його основі розроблено алгоритм (методика) порівняльної оцінки і вибору варіантів модернізації авіаційної техніки для розв'язання завдання з порівняльної оцінки і вибору кращого зразка авіаційного комплексу.

Цей алгоритм апробований на ряді прикладів, що підтверджує його працездатність.

Розроблений алгоритм з порівняльної оцінки і вибору кращого зразка авіаційного комплексу може бути взятий за основу при створенні системи підтримки прийняття рішень, яка б давала змогу обґрунтовано та оперативно приймати розв'язання щодо вибору кращого варіанта авіаційного комплексу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Семенов С. С. Оценка технического уровня образцов вооружения и военной техники / С. С. Семенов, В. Н. Харчев, А. И. Иоффин. — М. : Радио и связь, 2004. — 552 с.
2. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. / Т. Саати. — М. : Радио и связь, 1993. — 320 с.
3. Самков О. В. Методичний підхід до вирішення задачі порівняльної оцінки і вибору варіантів модернізації повітряних суден по сукупності кількісно-якісних показників // Матеріали 8 Міжнар. наук.-техн. конф. «Авіа-2007». — К. : НАУ, 2007. — Т. 2. — С. 34.9 — 34.12.

Стаття надійшла до редакції 22.09.09.

УДК 656.7.022.1'817 (045)

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МІЖНАРОДНИХ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ У СУЧАСНИХ УМОВАХ РОЗВИТКУ СВІТОВОЇ ЦИВІЛЬНОЇ АВІАЦІЇ

Д. О. Бугайко, К. О. Похиленко

Національний авіаційний університет

bugaiko@nau.edu.ua

У статті розглянуто сучасні тенденції розвитку світової цивільної авіації. Проаналізовано шляхи підвищення ефективності експлуатації міжнародних повітряних ліній у сучасних умовах.

Modern trends in the world civil aviation development are considered in the article. The ways of efficiency increase of international airlines exploitation in modern conditions are analysed.

Постановка проблеми

На комерційну експлуатацію міжнародних повітряних ліній (МПЛ) суттєво впливають сучасні тенденції розвитку світової цивільної авіації (ЦА). За останнє десятиріччя відбулися істотні зміни в галузі ЦА, які необхідно враховувати для підвищення ефективності комерційної експлуатації МПЛ. До найбільш важливих з них належать: зміни у сфері регулювання повітряного транспорту, політика лібералізації, зміни у структурі галузі, поява нових каналів збуту продукції, укладання союзів між авіакомпаніями, поява нових моделей бізнесу авіакомпаній, приватизація авіакомпаній, жорстка конкуренція між перевізниками, особливо на міжнародному рівні, проблеми оновлення парку повітряних суден (ПС), зростання ціни на паливо.

Аналіз досліджень і публікацій

Дослідженням сучасних тенденцій розвитку світової ЦА постійно займаються провідні організації в галузі ЦА *International Civil Aviation Organization* (ICAO) та *International Air Transportation Association* (IATA), зарубіжні та вітчизняні науковці В. Г. Афанасьєв, Ю. Ф. Кулаєв, Н. Є. Полянська, О.В. Костроміна та ін.

Загальна проблема

На сьогодні залишається невирішеним питання підвищення ефективності експлуатації МПЛ в умовах сучасних тенденцій ЦА та жорсткої конкуренції. Актуальною проблемою є пошук нових шляхів підвищення комерційної експлуатації МПЛ у сучасних умовах.

Мета статті

Метою статті є аналіз сучасних тенденцій світової ЦА та пошук шляхів підвищення ефективності комерційної експлуатації МПЛ.

Викладення основного матеріалу

Одна з найважливіших тенденцій у ЦА сьогодні — лібералізація регулювання міжнародних повітряних сполучень. Сьогодні все більше держав стають учасниками домовленостей про пов-

ний доступ до ринку. На національному рівні ряд держав почали процес перегляду своєї авіатранспортної політики у світлі глобальної тенденції до більшої лібералізації. Деякі з цих концепцій спрямовані на лібералізацію повітряних сполучень повністю або частково в односторонньому порядку без вимог замість порівняних прав від партнерів за двосторонніми угодами. Інші спрямовано на лібералізацію внутрішніх ринків повітряних перевезень і також на дозвіл більшої кількості перевізників виконувати польоти за міжнародними маршрутами.

На двосторонньому рівні понад 70 % двосторонніх угод про повітряне сполучення, які були нещодавно укладені або переглянуті, містили деякі форми домовленостей, що лібералізували деякі аспекти авіаційної взаємодії країн, такі як необмежені комерційні права (права третьої, четвертої і в ряді випадків п'ятої свобод), призначення декількох перевізників з обмеженнями або без обмежень маршрутів, вільне введення місткостей, ліберальні режими встановлення тарифів і вільніші критерії для володіння авіаперевізниками та їх контролю. До важливих змін належать значне збільшення кількості угод типу «відкритого неба», які надають повний доступ до ринку без обмежень по пунктах призначення, маршрутах, провізних спроможностях, частот, спільного використання кодів і тарифів. За останнє десятиріччя було укладено понад 85 таких угод між 70 державами. Ці угоди включали не тільки розвинуті країни, але і зростаючу кількість держав, що розвиваються (які беруть участь у понад 60 % угод).

Разом із внутрішньо регіональною лібералізацією спостерігається зростання взаємодії між регіонами. Найбільш значним є збільшення кількості переговорів у сфері повітряних перевезень із залученням регіональних груп з одного боку і держави або груп держав з іншого боку. Виходячи з цього, ЄС був найбільш активним у цьому процесі, а Європейська комісія наразі займається веденням таких переговорів відповідно до конк-

ретного кола повноважень, який отриманий нею від усіх держав-членів ЄС. Такий підхід призвів до укладання декількох домовленостей у сфері лібералізації або переговорів з приводу їх заключення (наприклад, між ЄС і Сполученими Штатами Америки, ЄС і Марокко, а також між Асоціацією держав Південно-Східної Азії (АСЕАН) і Китаєм). Такі переговори привнесли нові координати у взаємини держав, що стосуються авіації. У 2005 р. в результаті такої тривалої тенденції лібералізації у сфері регулювання повітряного транспорту приблизно 20 % пар держав, що виконують безпосадкові пасажирські перевезення, і майже половина пропозицій стосовно пасажирських місць припадали на держави, що обрали концепцію лібералізації або за допомогою двосторонніх угод про повітряні сполучення в рамках «відкритого неба», або за допомогою регіональних угод або заходів у сфері лібералізації (порівняно з менш ніж 4 % і близько 20 % відповідно до 1995 р.).

Інші заходи більш загального характеру у сфері регулювання також стосуються повітряного транспорту. Серед таких заходів: ухвалення законів про конкуренцію, введення різних податків, розширення відповідальності авіакомпаній за виконання вимог до в'їзду до країни (особливо відносно пасажирів, що не мають на це права), введення в дію жорсткіших вимог до стану здоров'я при в'їзді в країну, а також національні програми по контролю за наркотиками.

Іншою тенденцією світової цивільної авіації сьогодні є зміни структури галузі повітряного транспорту, які традиційно походять від необхідності задовольнити зростаючий попит на авіатранспортні послуги на ринках із зростаючою конкуренцією і в більш глобалізованому економічному оточенні.

Мега-перевізники у Сполучених Штатах Америки застосовують новий експлуатаційний підхід — використання великих «комплексів» рейсів, що стикаються, задля максимального збільшення кількості пар міст, які можуть бути обслуговувати кожним рейсом. Цей експлуатаційний підхід виник у результаті усвідомленої необхідності використовувати декілька вузлових аеропортів і досягати «критичної маси» (тобто величини, достатньої для отримання економії розміру і частоти руху, впливати на ринкові умови).

Авіакомпанії все більше використовують засновані на застосуванні комп'ютерів заходи для підвищення продуктивності і оптимізації доходів, включаючи користування автоматизованими системами для управління прибутковими ставками, маркетингу, продажу і комунікації. По-перше, створення досконалих систем управління прибутковими ставками, пов'язане з використанням комп'ютерів, дало змогу авіакомпаніям ре-

гулювати на кожному рейсі співвідношення пасажирів з високими (*normal fares*) і низькими тарифами (*special fares*) задля максимізації доходів і ефективного надання місць. Система контролю питомих доходів дала змогу давно існуючим авіакомпаніям з високою собівартістю в деяких випадках вибірково конкурувати з авіакомпаніями з низькою собівартістю (*low cost airlines, discounters airlines*), які часто покладаються на низькі тарифи з метою проникнення на ринок.

Важливою зміною в області збуту і продажу послуг авіакомпаній, яке сполучає використання комп'ютерів і персональних систем зв'язку, є прямий продаж споживачам, включаючи і через мережу Інтернет. Хоча велика частина продажу квитків авіакомпаній все ще здійснюється через традиційні туристичні агентства, частка прямого продажу «он-лайн» через Інтернет швидко зростає, особливо в країнах з великим поширенням Інтернету і кредитних карток. Такий хід подій створив нові можливості, а також нові проблеми для авіакомпаній і продавців послуг комп'ютерної системи бронювання (КСБ). Багато авіакомпаній почали збільшувати продаж «он-лайн» як спосіб зниження збутових витрат. Деякі об'єдналися для створення відповідних сторінок в Інтернеті, щоб максимізувати вигоди від електронної комерції. Чотири глобальних КСБ — Амадеус, Галілео, Сепбр і Уорлдспен — також зробили дії з адаптації до нової комерційної обстановки і стали освоювати ринок Інтернету шляхом різних стратегічних рішень, перетворюючись на глобальні дистрибуційні системи (ГДС). ГДС пропонують всеосяжну інформацію, послуги бронювання і методи електронної комерції для поїздок і туризму (повітряні подорожі, оренда автомобілів, розвиток сполучень інших видів транспорту, готелю, місцями відпочинку). Іншою важливою зміною в цій області є електронне оформлення квитків, що спочатку пропонувалося на внутрішніх рейсах Сполучених Штатів Америки, але наразі надається на міжнародних рейсах у всіх регіонах. В еру зростаючої конкуренції ці зміни дають значну економію витрат для авіакомпаній, а також диверсифікацію їх засобів збуту [1].

Інші заходи більш загального характеру у сфері регулювання також стосуються повітряного транспорту. Серед таких заходів: ухвалення законів про конкуренцію, введення різних податків, розширення відповідальності авіакомпаній за виконання вимог до в'їзду до країни (особливо відносно пасажирів, що не мають на це права), введення в дію жорсткіших вимог до стану здоров'я при в'їзді в країну, а також національні програми по контролю за наркотиками.

Іншою тенденцією світової цивільної авіації сьогодні є зміни структури галузі повітряного

транспорту, які традиційно походять від необхідності задовольнити зростаючий попит на авіатранспортні послуги на ринках із зростаючою конкуренцією і в більш глобалізованому економічному оточенні.

Мега-перевізники у Сполучених Штатах Америки застосовують новий експлуатаційний підхід — використання великих «комплексів» рейсів, що стикаються, задля максимального збільшення кількості пар міст, які можуть бути обслуговувати кожним рейсом. Цей експлуатаційний підхід виник у результаті усвідомленої необхідності використовувати декілька вузлових аеропортів і досягати «критичної маси» (тобто величини, достатньої для отримання економії розміру і частоти руху, впливати на ринкові умови).

Авіакомпанії все більше використовують засновані на застосуванні комп'ютерів заходи для підвищення продуктивності і оптимізації доходів, включаючи користування автоматизованими системами для управління прибутковими ставками, маркетингу, продажу і комунікації. По-перше, створення досконалих систем управління прибутковими ставками, пов'язане з використанням комп'ютерів, дало змогу авіакомпаніям регулювати на кожному рейсі співвідношення пасажирів з високими (*normal fares*) і низькими тарифами (*special fares*) задля максимізації доходів і ефективного надання місць. Система контролю питомих доходів дала змогу давно існуючим авіакомпаніям з високою собівартістю в деяких випадках вибірково конкурувати з авіакомпаніями з низькою собівартістю (*low cost airlines, discounters airlines*), які часто покладаються на низькі тарифи з метою проникнення на ринок.

Важливою зміною в області збуту і продажу послуг авіакомпаній, яке сполучає використання комп'ютерів і персональних систем зв'язку, є прямий продаж споживачам, включаючи і через мережу Інтернет. Хоча велика частина продажу квитків авіакомпаній все ще здійснюється через традиційні туристичні агентства, частка прямого продажу «он-лайн» через Інтернет швидко зростає, особливо в країнах з великим поширенням Інтернету і кредитних карток. Такий хід подій створив нові можливості, а також нові проблеми для авіакомпаній і продавців послуг комп'ютерної системи бронювання (КСБ). Багато авіакомпаній почали збільшувати продаж «он-лайн» як спосіб зниження збутових витрат. Деякі об'єдналися для створення відповідних сторінок в Інтернеті, щоб максимізувати вигоди від електронної комерції. Чотири глобальних КСБ — Амадеус, Галілео, Сепбр і Уорлдспен — також зробили дії з адаптації до нової комерційної обстановки і стали освоювати ринок Інтернету шляхом різних стратегічних рішень, перетворюючись на глобальні дистрибуційні системи (ГДС). ГДС пропонують

всеосяжну інформацію, послуги бронювання і методи електронної комерції для поїздок і туризму (повітряні подорожі, оренда автомобілів, розвиток сполучень інших видів транспорту, готелю, місцями відпочинку). Іншою важливою зміною в цій області є електронне оформлення квитків, що спочатку пропонувалося на внутрішніх рейсах Сполучених Штатів Америки, але наразі надається на міжнародних рейсах у всіх регіонах. В еру зростаючої конкуренції ці зміни дають значну економію витрат для авіакомпаній, а також диверсифікацію їх засобів збуту [1].

Укладання альянсів між авіакомпаніями, а також угод про спільний маркетинг є відносно недавнім, але швидко поширюваним явищем, що використовується для отримання і поліпшення доступу до ринку (хоча і не безпосередньо) і синергії (наприклад, обходячи обмеження двосторонніх угод з доступу до ринку, володіння і контролю). На сьогодні в світі налічується понад 600 таких добровільних союзницьких угод типу «Інтерлайн», що містять різні елементи, такі як спільне використання кодів, блоки місць, співпраця по маркетингу, ціноутворенню, контролю наявності місць і програми для пасажирів, які користуються послугами авіакомпаній (FFP), координації розкладів, спільним використанням офісів і аеропортів засобів, спільні рейси і використання торговельних марок («франшиза»). Серед транснаціональних груп є чотири конкуруючі «глобальні альянси», а саме *Star Alliance, Oneworld, Sky Team i Wings*. Членами кожної групи є декілька найбільших авіакомпаній з географічно різними зонами дії та поширеною мережею авіаліній. Завдяки союзам, ці перевізники об'єднали мережі своїх маршрутів, які охоплюють більшість районів світу, і спільно здійснюють понад 50 % світового обсягу регулярних пасажирських перевезень. Стратегічні альянси є відповіддю авіакомпаній на регулятивні обмеження, необхідність знижувати свої та більшу глобалізацію і конкуренцію на ринках повітряних перевезень. У Європі і Північній Америці виникли також альянси з іншими видами транспорту (із залізницями). Ще однією тенденцією світової ЦА є поява нових моделей бізнесу авіакомпаній.

Останнім часом успішно працюють низьковитратні перевізники (*low cost airlines*), які конкурують з великими авіакомпаніями, моделями яких є мережі повітряних ліній з повним комплексом послуг. Загальними рисами моделі бізнесу перевізників з низькою собівартістю є з деякими варіаціями: мережа прямих рейсів між пунктами з концентрацією на маршрутах короткої протяжності, висока частота рейсів, проста структура низьких тарифів, кабіни одного класу з високою щільністю крісел і без призначення місць, просте обслуговування на борту, багато-

функціональність персоналу і мінімум адміністрації, інтенсивне використання засобів електронної комерції для маркетингу і збуту продукції (включаючи бронювання місць «он-лайн» через Інтернет і електронне забезпечення квитками). Для підтримки низьких витрат ці перевізники зазвичай експлуатують один тип літака з високим добовим нальотом. Вони також використовують менш завантажені вторинні аеропорти, для того, щоб забезпечити швидку оборотність літаків та регулярність і понизити свої витрати аеропортів. Низькі експлуатаційні витрати дають змогу авіакомпаніям з низькою собівартістю надавати всі їх місця для продажу по низьких тарифах. Успіх низьковитратних авіаперевізників з прямими рейсами між обслуговуваними пунктами змусив деякі великі авіакомпанії утворити дочірні авіакомпанії або окремі підрозділи для конкуренції з ними [2].

Приватизація державних авіакомпаній була одним з видатних перетворень у сфері міжнародного повітряного транспорту, де, за винятком небагатьох держав, авіакомпанії до недавнього часу перебували у власності держави. Мотиви для приватизації були різними — від суто економічних міркувань або для підвищення експлуатаційної ефективності і конкурентоспроможності до намірів зменшити фінансовий тягар держави з фінансування капіталовкладень у нову техніку.

Починаючи з 1985 р., близько 130 держав оголосили про приватизацію або повідомили про наміри приватизувати близько 190 авіакомпаній, що належать державі. За цей час цілі приватизації були досягнуті відносно близько 90 обраних для цього перевізників. У багатьох місцях світу авіакомпанії продовжували зміцнювати свої позиції на ринку шляхом злиття, придбань або експлуатаційної інтеграції в рамках єдиної холдінгової компанії. Загальним напрямом цієї тенденції є розвиток стратегій, що продовжується, зростання націлених на збереження і розширення існуючої частки ринку, доступ до нових ринків, зниження собівартості, захист від конкуренції і розширення масштабу експлуатаційної діяльності, для того, щоб досягти критичної ваги на ринку [3].

Традиційно головним завданням на авіатранспорті залишається забезпечення безпеки польотів. На сьогодні досягнуто значне поліпшення безпеки повітряних перевезень. Крім цього, значно підвищилася якість обслуговування клієнтів авіакомпаній. Під якістю обслуговування маються на увазі різні аспекти, серед яких тривалість польотів, зручність і надійність сервісу, комфорт у салоні ПС і ряд послуг на борту літака. Деякі з цих чинників важко піддаються об'єктивній оцінці. Проте збільшення швидкості польоту ПС і протяжність середнього етапу польоту позитивно позначилися на часі польоту і зручностях пасажирів. У цілому по світу середня комерційна швидкість ПС зросла з 360 км/год у 1960 р. до 630 км/год у 1980 р. і 674 км/год у 2005 р. (приріст

90 % порівняно з 1960 р.). Середній етап польоту збільшився більш ніж удвічі з 470 км у 1960 р. до 1239 км у 2005 р. Остання тенденція пов'язана з великою кількістю прямих маршрутів і зменшенням кількості посадок для дозаправки, внаслідок цього польоти стали зручнішими для пасажирів. Зі збільшенням швидкості літаків і зменшення кількості зупинок загальний час польоту пасажирів скоротився, особливо на маршрутах, що складаються з багаточисельних етапів польоту.

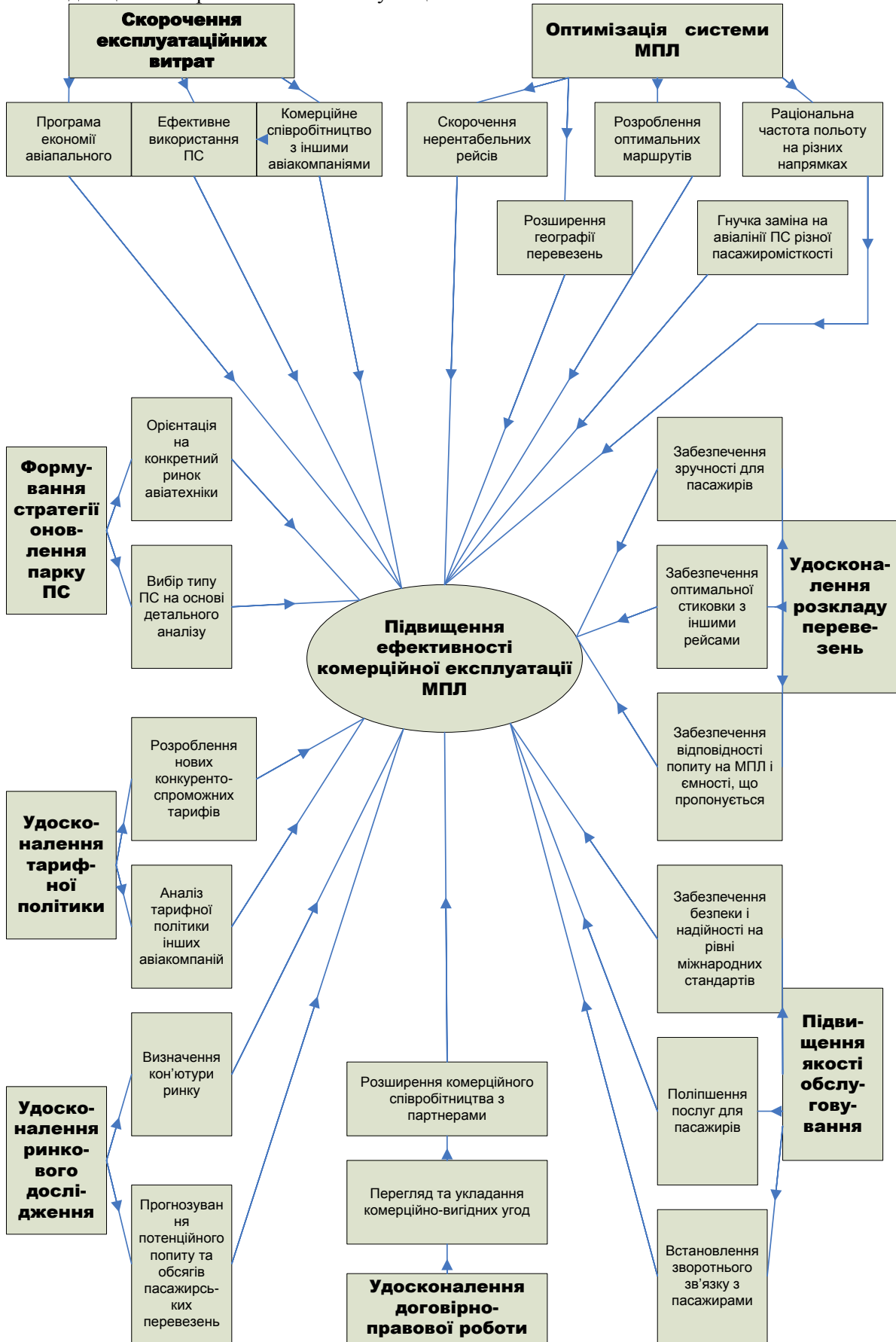
У відповідь на збільшення попиту на повітряні перевезення внаслідок дії таких чинників, як загальний економічний розвиток, авіакомпанії змогли без додаткових витрат збільшити частоту польотів і ввести безпосадкові рейси між великою кількістю пар міст. Таке поліпшення якості обслуговування, своєю чергою, стало стимулом для збільшення попиту на повітряні перевезення в довготривалому плані, хоча були також випадки короточасного падіння попиту під впливом так званих чинників страху і незручностей та інших неекономічних чинників. У період з 1960 до 2005 рр. кількість вильотів ПС збільшилася понад на 270 %, що свідчить про збільшення частоти польотів і додаткові зручності для пасажирів.

Що стосується авіавантажу, то надзвичайно організовані авіакомпанії/компанії з термінової доставки посилок, що істотно зросли за останнє десятиліття, продовжують розширювати цей спеціалізований вид послуг. Ці компанії використовують парки великих реактивних вантажних ПС у поєднанні з системами наземної доставки задля забезпечення доставки через стратегічно розташовані сортувальні вузлові аеропорти наступного дня при польотах на континенті і через день при міжконтинентальних польотах. Дана концепція також була обрана рядом поштових адміністрацій.

На сьогодні в авіаційній галузі світу помітні й негативні тенденції, які впливають на зменшення попиту на авіаційні перевезення. До них належать: фінансова нестабільність у світі, інфляція, зростання цін і безробіття. Крім цього, в останні роки загострюється проблема модернізації льотного парку. Багато авіакомпаній потребують оновлення льотного парку, оскільки їхні літаки є морально застарілими та не відповідають нормам авіаційної безпеки. Це своєю чергою знижує конкурентоспроможність авіакомпаній. Але модернізація парку літаків потребує значних фінансових коштів, що пов'язано з постійним дорожчанням авіаційної техніки. Економія авіаційного палива — ще одна проблема сучасних авіакомпаній.

Вирішення проблем, що стоять перед авіаційною галуззю на сучасному етапі, стане кроком уперед у розвитку світових авіаційних перевезень. З урахуванням сучасних тенденцій світової ЦА та жорсткої конкуренції була спроектована комплексна модель підвищення ефективності експлуатації МПЛ (див. рисунок). Пропонуються такі

шляхи підвищення ефективності експлуатації МПЛ:



Комплексна модель підвищення ефективності комерційної експлуатації МПЛ

1. Скорочення експлуатаційних витрат. Закупка авіаційного палива — суттєва частина експлуатаційних витрат. Ураховуючи високі ціни на авіаційне паливо сьогодні, доцільним буде введення програм економії авіаційного палива. Крім того, ефективне комерційне співробітництво з іншими авіакомпаніями зі спільної експлуатації авіаліній сприятиме більш ефективному використанню парку ПС, скороченню витрат на авіаційне паливо та інших експлуатаційних витрат.

2. Оптимізація системи МПЛ. У сучасних умовах авіатранспортного ринку важливим для авіаперевізників є розроблення оптимальних маршрутів і найбільш раціональних частот польотів на різних напрямках, скорочення нерентабельних рейсів, уведення нової економічно ефективної авіаційної техніки, розширення географії перевезень, підвищення ефективності виконання чартерних та додаткових рейсів, гнучка заміна на авіалініях ПС різної пасажиромісткості.

3. Удосконалення розкладу перевезень. Рейси авіакомпанії повинні бути зручними для пасажирів, а також забезпечувати оптимальну стиковку з іншими внутрішніми та міжнародними рейсами. Це допоможе залучити додаткових пасажирів на рейси певної авіакомпанії.

4. Удосконалення договірно-правової роботи. Для ефективної роботи авіакомпанії необхідно переглядати чинні та укладати нові комерційно вигідні угоди для того, щоб розширювати комерційне співробітництво з іншими авіакомпаніями, агентами, турфірмами та іншими діловими партнерами. Удосконалення договірно-правової роботи важливо не тільки на рівні авіакомпаній, а й у сфері міжурядових угод, від яких залежить отримання сприятливих умов комерційної роботи авіакомпаній.

5. Підвищення якості обслуговування перевезень. Якість обслуговування — важливий момент усієї комерційної діяльності на МПЛ. Задоволення попиту викликає подальший попит на перевезення певної авіакомпанії, і навпаки, незадоволеність обслуговуванням авіакомпанії призводить до втрати потенційних пасажирів. Тому підвищення якості обслуговування сприяє не тільки підвищенню престижу авіакомпанії, а також і економічній ефективності, завдяки залученню пасажирів на рейси авіакомпанії, яка добре зарекомендувала себе з погляду високої якості обслуговування.

6. Удосконалення ринкового дослідження. Метою вивчення ринку міжнародних повітряних перевезень є визначення стану ринку, тобто його кон'юнктури. Під час вивчення кон'юнктури ринку виявляють потенційний попит на повітряні перевезення у певний момент часу, а також можливості його задоволення. Для ефективної експлуатації МПЛ необхідно систематично досліджувати ринок та реагувати на всі його коливання [4].

7. Удосконалення тарифної політики. Вдала тарифна політика — важливий інструмент підвищення доходності авіакомпанії. Тарифна політика авіакомпанії в складних сучасних умовах повинна бути напрямлена на підвищення конкурентоспроможності авіакомпанії за рахунок розробки нових конкурентоспроможних тарифів на основі аналізу тарифної політики інших авіакомпаній. Ефективна експлуатація МПЛ у сучасних умовах підвищує конкурентоспроможність авіакомпаній на міжнародному ринку повітряних перевезень.

Шляхи підвищення комерційної експлуатації міжнародних повітряних ліній найбільш раціонально розглядати у комплексі для досягнення авіакомпаніями ефективності діяльності.

Висновки

Викладений у статті матеріал дає змогу зробити висновок про необхідність пошуку та використання шляхів підвищення ефективності комерційної експлуатації МПЛ у сучасних умовах, що є запорукою розвитку безпечного, регулярного та ефективного міжнародного авіаційного сполучення.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Прогноз* розвитку воздушного транспорта до 2015 года / Циркуляр ІСАО 304 — АТ/127, Монреаль : сентябрь 2004 г. — 58 с.
2. *Прогноз* развития воздушного транспорта до 2025 года / Циркуляр ІСАО 313 — АТ/134, Монреаль : сентябрь 2007 г. — 64 с.
3. *Мир* гражданской авиации 2003—2006 / Циркуляр ІСАО 307 — АТ/129.
4. *Афанасьев В.Г.* Коммерческая эксплуатация международных воздушных линий / В. Г. Афанасьев. — М. : Транспорт, 1987. — 281 с.
5. *Бугайко Д.О.* Лібералізація регулювання перевезень — економічно-правовий інструмент розвитку міжнародних повітряних сполучень // Економіка та менеджмент; т. 3 : матеріали VIII міжнар. наук.-техн. конф. «Авіа-2007» / Д. О. Бугайко, А. В. Чепурна. — К. : НАУ, 2007. — С. 51.22 — 51.25.

Стаття надійшла до редакції 20.10.09.

УДК 620.178.16 (045)

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ ПОКРИТТІВ НА АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВАХ В УМОВАХ ТЕРТЯ КОВЗАННЯ

В. Ф. Лабунець, О. А. Городиський

Національний авіаційний університет

int2080@ukr.net

У статті проаналізовано сучасний стан застосування електроіскрових покриттів на алюмінієвих сплавах в умовах тертя ковзання. Виконано випробування зносостійкості електроіскрових покриттів на алюмінієвому сплаві АЛ9 в умовах тертя ковзання. Показано, що інтенсивність зношування електроіскрових покриттів на алюмінієвому сплаві АЛ9 залежить більшою мірою від швидкості ковзання.

The analysis of electro-spark coverages on aluminium alloys use under conditions of friction sliding is presented in this article. Tests of wear resistance of electro-spark coverages on the aluminium alloy AL9 in the conditions of friction sliding have been executed. It is denoted that intensity of wear of electro-spark coverages on the aluminium alloy AL9 the most depends on speed of sliding.

Загальна постановка проблеми та її зв'язок з науково-практичними задачами

Однією з актуальних задач сучасного машинобудування є збільшення зносостійкості перспективних конструкційних матеріалів.

До таких матеріалів належать сплави на основі титана та алюмінію, завдяки їх високій питомій міцності, жорсткості, хорошим демпферним характеристикам та корозійній стійкості. Основною перевагою алюмінієвих сплавів як конструкційних є висока питома міцність.

Алюмінієві сплави є найважливішими авіаційними матеріалами і наразі становлять до 80 % маси конструкції повітряних суден (ПС).

Завдяки високим питомим параметрам, технологічності і широкій доступності алюмінію і його сплави знаходять застосування не тільки в авіабудуванні, але й у всіх галузях промисловості.

Із алюмінієвих сплавів виготовляють елементи силового набору літаків, обшивки крила і фюзеляжу, корпусні деталі компресора деяких типів авіаційних ГТД, корпуси паливних та мастильних насосів, поршні двигунів внутрішнього згоряння та ін. Проведений аналіз дефектів деталей авіаційної техніки показав, що причиною втрати працездатності деталей із алюмінієвих сплавів поряд із руйнуванням унаслідок втоми є корозія і зношування. Традиційним і ефективним захисним покриттям для алюмінієвих сплавів є електро-хімічне анодування.

Але захисна оксидна плівка, що утворюється при електрохімічному анодуванні, є ефективною лише для захисту від корозії.

У вузлах тертя вона швидко руйнується і ненадійно захищає від зношування. Тому використання електроіскрового легування алюмінієвих сплавів значною мірою вирішує цю проблему.

Огляд публікацій та аналіз невирішених проблем

Аналіз літературних джерел з технології нанесення електроіскрових покриттів (ЕІЛ), а також результати особистих досліджень дають можливість розробити конкретний методологічний підхід до вибору матеріалів покриттів, оптимізації технологічних режимів їх отримання та параметрів кінцевої обробки під час створення зносостійких покриттів для підвищення триботехнічних характеристик вузлів тертя ковзання.

Сутність цього підходу полягає в тому, що замість дорогих антифрикційних матеріалів (бронз, латуней) слід використовувати більш дешеві сплави на основі алюмінію з композиційними дискретними покриттями [1].

Підвищення триботехнічних характеристик вузлів тертя ковзання реалізується через науково обґрунтований вибір матеріалу електрода з урахуванням експлуатаційних, міцнісних і екологічних вимог до покриттів, а також режимів нанесення і завершальної обробки композиційних покриттів з дискретною структурою. Комплексний підхід до вибору конструктивних параметрів композиційних покриттів і режимів їх нанесення, використання експериментально-статистичних методів і критеріальних залежностей, дає змогу керувати технологією нанесення з кількома параметрами для отримання покриттів із заданими фізико-механічними і трибологічними властивостями.

Матеріали і методи дослідження

Мета роботи — дослідження зносостійкості електроіскрових покриттів на алюмінієвих сплавах в умовах тертя ковзання.

На основі цього методологічного підходу розроблено методику нанесення композиційних покриттів електроіскровим легуванням на деталі вузлів тертя ковзання із алюмінієвих сплавів.

Особливість цієї технології полягає в тому, що вона дає змогу оператору, використовуючи науково розроблені рекомендації, керувати технологічними процесами, активно змінювати технологічні і конструктивні фактори на всіх етапах процесу зміцнення алюмінієвих сплавів для створення композиційних дискретних покриттів із заданими властивостями.

Випробування на тертя та зношування композиційних покриттів на алюмінієвих сплавах

в умовах тертя ковзання без мастильного матеріалу проводили на машині тертя ковзання, що описана в праці [2].

Установка спроектована таким чином, що дає змогу випробувати дві пари тертя одночасно. Така схема дозволяє, фактично, проводити два експерименти в різних умовах — геометричні розміри та фізичні властивості зразків.

Схему установки показано на рис. 1.

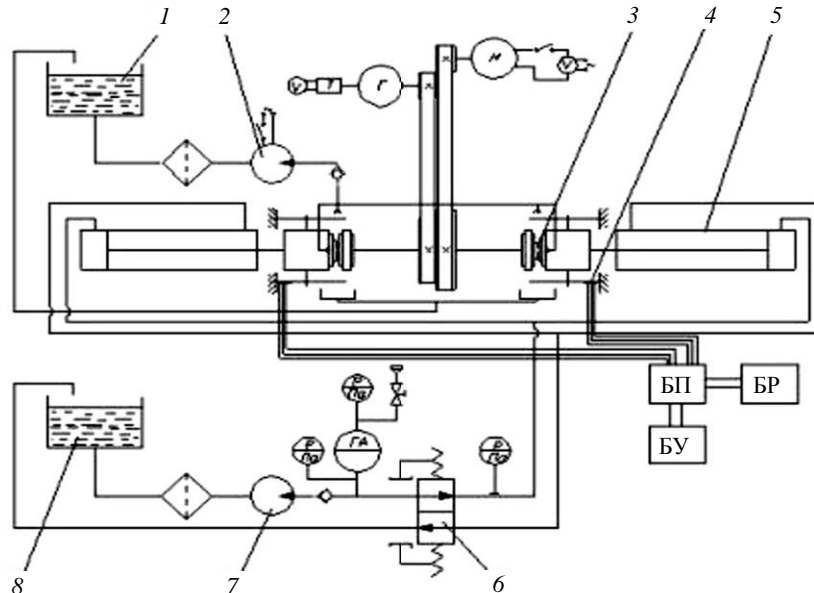


Рис. 1. Схема установки для дослідження триботехнічних характеристик матеріалів в умовах тертя ковзання

Машини тертя дає змогу встановлювати і контролювати навантаження до 300 кг, яке прикладається до зразків. Навантаження зразків виконуються за допомогою двох гідравлічних циліндрів (балок) 4, а контроль процесу навантаження виконується за допомогою ручного гідравлічного насоса 7 та манометра. Незмінність навантаження забезпечується за рахунок гідравлічного акумулятора 6. Частота обертання зразків, що випробовувалися, від 100 до 1000 об/хв. Досліджувалися умови, коли зразки омивалися мастильним матеріалом або знаходилися у ванні з мастилом. Під час омивання мастило з баку 1 за допомогою підкачувального насоса 2 потрапляє в зону тертя 3. З ємності, де знаходяться зразки, мастило самовільно стікає в бак 8.

Машини тертя дає змогу:

- досліджувати зношування, мастильну дію та ін.;
- вимірювати температуру тіла поблизу зони тертя;
- вимірювати температуру масла, яке потрапляє в зону тертя або знаходиться поблизу неї.

У процесі виготовлення установки використано два двигуни. Один з таких двигунів служить як привід для обертання 5, а інший як генератор для контролю частоти обертання (проти-

лежний). Керування потужністю двигуна виконувалося за допомогою автотрансформатора 6. Контроль за швидкістю обертання виконувався за допомогою потенціометра.

Для вимірювання моменту тертя було використано метод тензометрування. З цією метою балки 4 з тензодатчиками жорстко кріпилися на корпусі установки. Зусилля від моменту тертя передавалися на балку за допомогою стакана з важелями, на якому встановлювався зразок. Для запису на осцилограму зміну моменту тертя, було використано систему, яка складається з блоку перетворення сигналу, блоку підсилення та шлейфового осцилографа. Як тензодатчики використовувалися дровові тензорезистори загального призначення з одноелементною петлевою решіткою на плівковій основі ПКП-20-200 з номінальним опором 200 Ом і робочим струмом 30 мА. Коефіцієнт тензочутливості становить $2,0 \pm 0,2$, границя вимірювання відносних деформацій $3 \cdot 10^{-3}$, поперечна чутливість — 2 % від граничної.

Вимірювання температур виконувалося хромель-копелевими термопарами, як показчик було використано електронні потенціометри. Визначення зношування зразків і контрзразків виконувалося за допомогою аналітичних ваг. Досліди проводилися на зразках, які зображено на рис. 2.

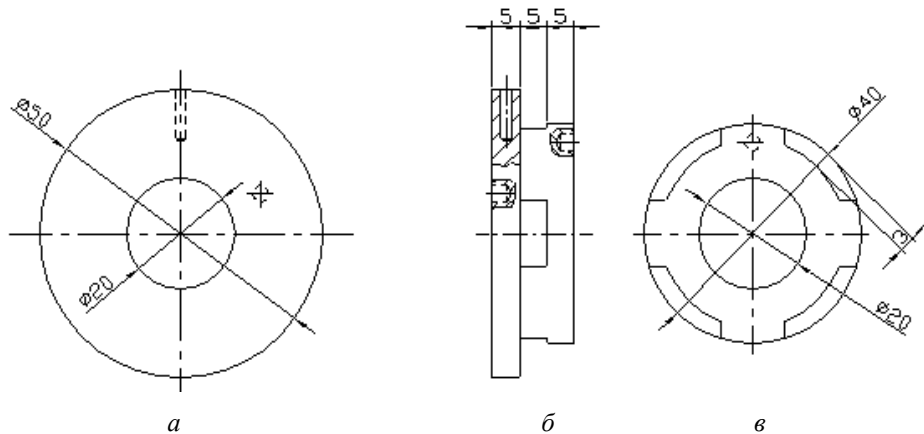


Рис. 2. Зразки для проведення дослідів:
а — зразок; б — розташування зразків у процесі дослідження; в — контрзразок

При торцевому терті коефіцієнт перекриття становить 1, а контртілом слугувала термооброблена сталь ШХ15.

Покриття на алюмінієвих сплавах АЛ9 наносили методом електро-іскрового легування [3; 4].

Як легуючі електроди використовували TiB_2 (ТБСАН) та $AlN-ZrB_2$ (ЦБСАН) з додаванням 5—10 % масової частки дисиліциду відповідного металу $Ti(Zr)Si_2$, а також на основі систем LaB_6-ZrB_2 (ЦЛАБ-1) та ZrB_2-LaB_6 (ЦЛАБ-2) [5—7].

Електроди (див. таблицю) отримували методом гарячого пресування під тиском 35 МПа при 1800 °С у вигляді шматків розміром 3×4×35 мм. Пористість зразків становить близько 3 %.

Фазовий склад електродних матеріалів, кут змочування Q системи «електродний матеріал — Al сплав», коефіцієнт масоперенесення K і товщина шару покриття при ЕІЛ

Електрод	Фазовий склад	Q , град.	K , %	Товщина шару, мкм
ЦБСАН	$AlN, ZrB_6, ZrSi_2$ твердий розчин $ZrSi$ та ZrB_2	55	60	20—30
ТБСАН	AlN, TiB_2 твердий розчин $TiSi_2$ у TiB_2	50	20	10—15
ЦЛАБ-2	$ZrB_2, ZrSi_2, LaB_6$ твердий розчин	35	< 0	—
ЦЛАБ-1	$ZrSi_2$ у $TiB_2, LaB_6, ZrB_2, Ni, Cr, Al$	—	30	—

Результати досліджень і їх обговорення

Результати випробувань покриттів на зносостійкість показано на рис. 3.

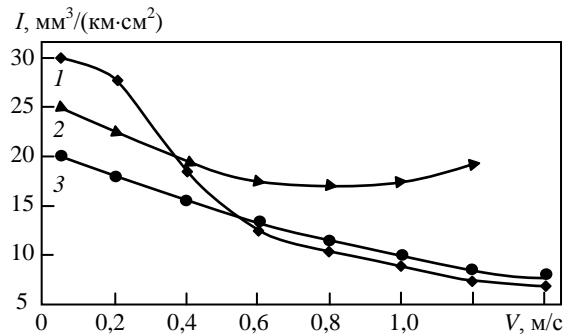


Рис. 3. Залежність інтенсивності зносу покриттів від швидкості ковзання:
1 — ЦБСАН; 2 — ТБСАН; 3 — ЦЛАБ-1

Як видно з рис. 3 швидкість ковзання істотно впливає на зносостійкість покриттів, а також електродних матеріалів за цих умов випробувань. Зі збільшенням швидкості ковзання інтенсивність зношування зменшується. Мінімальний знос спостерігається в разі швидкості ковзання 1,5 м/с, а максимальний — при 0,05 м/с. Зношення покриття ЦБСАН при швидкості ковзання 0,05 м/с становить 30 $mm^3/kg \cdot cm^2$ і є максимальним. Мінімальне зношування при даній швидкості ковзання становить 20 $mm^3/kg \cdot cm^2$ для електродного матеріалу ЦЛАБ-1.

Характер залежності зношування покриттів від швидкості ковзання ідентичний залежності зносу компактних електродних матеріалів, що свідчить про однакові фізико-механічні властивості вторинних структур, виникаючих на їх робочих поверхнях під час тертя. Відомо, що вторинні структури є визначальними у розвитку процесів на поверхнях тертя та їх інтенсивності [8].

При невеликих швидкостях ковзання, коли температура в поверхневих шарах випробовуваних покриттів та електродних матеріалів досягає

незначних величин (60—180 °С), процеси окиснення інтенсивного розвитку не отримують, а відповідно, вторинні структури не встигають сформуватися і розділити контактуючі поверхні, що сприяє утворенню вузлів схоплювання, збільшенню шорсткості поверхні, зростанню коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування. Зі збільшенням швидкості ковзання температура в поверхневих шарах покриттів і електродних матеріалів зростає, процеси окиснення інтенсифікуються, а утворені вторинні структури більш стійкі, ніж при невеликих швидкостях ковзання, що й забезпечує зниження інтенсивності зношування. На поверхні тертя в цих умовах випробувань відсутні вириви, вузли схоплювання, що свідчить про розвиток механо-хімічного зношування. Структура покриття не зазнає значних пластичних деформацій (рис. 4).

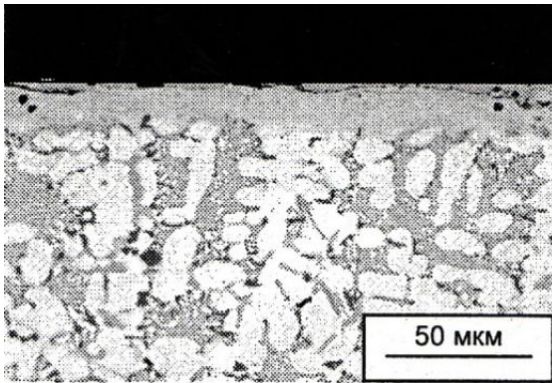


Рис. 4. Мікроструктура покриття ЦЛАБ-1 на сплаві АЛ9 в зоні доріжки тертя

Висновки

Дослідження зносостійкості електроіскрових покриттів на алюмінієвих сплавах в умовах тертя ковзання показали, що інтенсивність зношування залежить найбільшою мірою від швидкості ковзання. При низьких швидкостях ковзання в зоні контактної взаємодії спостерігається низький рівень температури, що не сприяє окисненню і вторинні структури не встигають сформуватись. У разі збільшення швидкості ковзання темпера-

тура зростає, інтенсифікуються процеси окиснення і утворюються стійкі вторинні структури, що знижують інтенсивність зношування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Самсонов Г. В. Перспективы применения волокон из SiC для армирования алюминиевых сплавов / Г. В. Самсонов, А. Д. Панасюк, В. А. Беспятый // Порошковая металлургия — 1975. — № 5 — С. 93—96.
2. Мнацаканов Р. Г. Первісне порівняння ресурсів роботи зубчастої передачі на маслі та пластичному мастилi / Р. Г. Мнацаканов, В. О. Довбуш, О. Є. Якобчук // Матеріали 3-ї Міжнар. наук.-техн. конф. АВІА-2001. — К., 2001. — Т. 1. — С. 03.9—03.12 — С.03.12.
3. Игнатенко Э. П. Формирование поверхностного слоя при ЭИЛ легкоплавкими металлами / Э. П. Игнатенко, А. Д. Верхотуров, М. З. Маркман // Трение и износ, 1979. — № 3. — С. 26—29.
4. Юречко Д. В. Физико-химическая модель формирования износостойких покрытий на алюминиевых сплавах при электроискровом масопереносе композиционной керамики/ Д. В. Юречко, И. А. Подчерняева, А. Д. Панасюк, О. Н. Григорьев // Порошковая металлургия. — 2000. — № 1/2. — С. 51—58.
5. Подчерняева И. А. Износостойкие слоистые электроискровые покрытия на основе ZrB_2 / И. А. Подчерняева, О. Н. Григорьев, В. Н. Субботин // Порошковая металлургия. — 2004. — № 7/8. — С. 77—81.
6. Подчерняева И. А. Электродные материалы для электроискрового легирования / И. А. Подчерняева. — М. : Наука, 1988. — 223 с.
7. Савуляк В. І. Дослідження зносостійкості деталей з алюмінієвих сплавів з композиційними покриттями системи ТБСАН та ЦБСАН / В. І. Савуляк, А. В. Губанів // Проблеми трибології. — 2008. — № 1. — С. 6—10.
8. Кудрин А. П. Износостойкость покрытий в условиях гидроабразивного изнашивания / А. П. Кудрин, В. Ф. Лабунец, О. А. Вишнеvский, Али Ризк // Промислова гiдравліка і пневматика. — 2004. — № 4. — С. 67 — 72.

Стаття надійшла до редакції 11.01.09.

УДК 669.295.018.256:620.194.3(045)

ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ, ЗМІЦНЕНОГО КЕРАМІЧНИМ КОМПОЗИЦІЙНИМ ПОКРИТТЯМ В УМОВАХ ФРЕТИНГ-КОРОЗІЇ*Лабунець В.Ф., Бурбела Ю.Б.*Національний авіаційний університет
int2080@ukr.net

У статті розглянуто зносостійкість титанового сплаву BT3-1 в умовах контактної навантаження. Проаналізовано ситуацію проведення цієї роботи. Досліджено зміцнення поверхні титанового сплаву керамічними композиційними покриттями. Наведено результати випробувань в умовах фретинг-корозії під час тертя без мастильного матеріалу на повітрі в системах «покриття—покриття» і «покриття—сталь 45».

In this article the wearproofness of titanic alloy of BT3-1 is considered under conditions of a contact loading. The situation analysis and needs in such work have been carried out. The research of the surface strengthening of this alloy with ceramic composition coverages is also described. The tests results under conditions of fretage at a friction without lubricating material out on the air in the systems „coverage-coverage” and „coverage-steel 45” are shown here.

Вступ

Підвищення надійності та довговічності деталей машин і механізмів, які працюють у різних умовах контактної взаємодії, здійснюється за допомогою конструктивних, технологічних та експлуатаційних методів.

Сучасні технологічні методи поверхневого зміцнення та відновлення деталей машин відкривають необмежені можливості для створення захисних структур триботехнічного призначення, що забезпечують надійну роботу вузлів тертя в різноманітних умовах контактної взаємодії, а саме: у разі великих навантажень; високих температур; великих швидкостей; при впливі вібрації, радіації, абразивних та корозійних середовищ тощо. Упровадженню у виробництво технологічних процесів створення таких захисних структур передують визначення провідних процесів, які розвиваються на деталях певних пар тертя, розробка технології створення захисних структур і визначення їх триботехнічних характеристик.

Аналіз чисельних досліджень дає змогу визначити такі основні шляхи створення поверхневого прошарку зовнішнім механічним (або тепловим) впливом без зміни його хімічного складу:

- зміна структури поверхневого прошарку легування його різноманітними хімічними елементами;
- нанесення на поверхню тертя покриттів;
- комбінація перерахованих вище методів.

На сьогодні широке використання знайшли методи отримання захисних композиційних структур, які значно підвищують працездатність деталей вузлів тертя.

Особливо це стосується вузлів тертя, від працездатності яких залежать надійність і довговічність авіаційної техніки. У конструкції вузлів тертя все частіше використовують деталі, виготовлені із титанових сплавів як перспективних

матеріалів триботехнічного призначення. Більш широкому використанню титанових сплавів у конструкціях трибовузлів будуть сприяти розробки науково-технологічних основ формування зносостійких покриттів, а також виконання комплексу досліджень з визначення їх триботехнічних властивостей з метою запровадження результатів досліджень у технологічних процесах поверхневого зміцнення та відновлення деталей вузлів тертя.

Аналіз досліджень

Основним споживачем титанових сплавів є галузь літакобудування, де використання цих матеріалів зумовлено, насамперед, високою питомою міцністю, жароміцністю і корозійною стійкістю [1]. Завдяки цим властивостям титанові сплави все більше витісняють із конструкції літаків і авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) конструкційні сплави на основі заліза, а під час експлуатації в умовах низьких і високих температур (до 500—550 °С) відповідно холодостійкі нержавіючі сталі і жароміцні сплави, причому обсяг використання титанових сплавів у літакобудуванні постійно зростає [2].

Різнманітність силових, контактних, температурних, корозійних та інших умов роботи деталей різних вузлів, систем і агрегатів повітряних суден і авіаційних ГТД приводить до процесів, які відбуваються як на поверхні, так і в тілі деталей, утворюючи різні за характером пошкодження та дефекти, в тому числі обумовлюють різні процеси, які відповідають за механізм та характер зношування.

З метою виявлення масштабів пошкодження деталей вузлів тертя на прикладі одного з авіаційних ГТД було проведено статистичний аналіз усіх несправностей і дефектів з визначенням відсотків по кожному із них у загальній кількості. Аналіз виконувався на основі інформації за даними дефектації деталей під час ремонту. Спо-

чатку аналізувались усі несправності і дефекти, які стали причиною вибракування деталей. До групи дефектів, пов'язаних з тертям та зношуванням належали такі, як спрацювання, знос поверхні, зменшення розміру, збільшення зазору у спряженні, відсутність натягу та інші подібні, які за своїми ознаками вказували про появу їх унаслідок тертя. Значну частку складають також дефекти пов'язані з об'ємним руйнуванням деталей — забоїни, сколи, тріщини, руйнування від втоми або «руйнування під дією статичного навантаження».

До першої групи належать деталі, зношування яких відбувається по поверхнях у номінально нерухомих з'єднаннях і пов'язане з розвитком фретинг-корозії. З цієї групи деталей найбільш значними за кількістю встановлених на двигуні, інтенсивністю зношування і впливу на показники надійності та вартості витрат за необхідності заміни їх під час ремонту є робочі лопатки компресора, насамперед бандажовані з антивібраційними полицями (АВП). Як показав аналіз, зношування лопаток відбувається по контактних поверхнях АВП унаслідок відносно циклічного вібропереміщення під дією вібрації, яка виникає за причини неурівноважування маси ротора і пульсації газового потоку. Вібрація і тертя в стиках замкових з'єднань робочих лопаток з диском призводить до утворення на контактних поверхнях лопаток пошкоджень, викликаних фретинг-корозією, і як неодноразово спостерігалось, стає причиною втомного руйнування лопаток по замковій частині і міжфазових виступів дисків компресорів ГТД із титанових сплавів при їх експлуатації [3].

До деталей першої групи, зношування яких пов'язане з розвитком фретинг-корозії по поверхнях в номінально нерухомих з'єднаннях, належать також напрямні лопатки компресора, переходники, кільця та інші, для яких вібрація і знакозмінне навантаження в процесі експлуатації є постійно діючим фактором.

Другу велику групу деталей ГТД із титанових сплавів складають деталі, зношування яких пов'язане з тертям ковзання. Найбільш масовими деталями цієї групи є робочі лопатки компресора низького і високого тиску. Причиною відбракування, спільною для цих деталей, є знос торців та, як наслідок, зменшення висоти лопаток, яка за міжремонтний період досягає 0,2 мм і більше.

Завдання

Дослідити зносостійкість титанового сплаву ВТЗ-1 в умовах фретинг-корозії, зміцненого керамічними композиційними покриттями.

Основний матеріал дослідження

Найважливіше значення висока питома міцність титанових сплавів має для авіаційної і ра-

кетно-космічної техніки, де важливу роль відіграє фактор вагової характеристики конструкції. Температурний інтервал використання титанових сплавів завдяки збереженню високої питомої міцності і жаростійкості сягає від криогенних температур до температури 500—550 °С, а для окремих сплавів, таких як інтерметалідний сплав TiAl (50 масових часток % Ti + 50 масових часток % Al) може доходити до 1100—1200 °С. При звичайних температурах титан і сплави на його основі майже не піддаються атмосферній корозії і корозії під дією більшості кислот і лужних розчинів, що забезпечує їх високу корозійну стійкість без застосування спеціальних засобів захисту, без яких використання більшості інших конструкційних сплавів у корозійних середовищах неможливе.

Якщо за рівнем питомої міцності і корозійної стійкості титанові сплави задовольняють вимоги конструкційного матеріалу для сучасної техніки і можуть не тільки конкурувати, а навіть мають значну перевагу над багатьма іншими конструкційними сплавами, то використання їх у вузлах тертя без певної зміцнювальної поверхневої обробки або захисних покриттів у більшості випадків не можливе. Незалежно від системи легування, фазового і структурного стану, рівня міцності і твердості, сплави на основі титану відрізняються низькими триботехнічними властивостями і схильні до схоплення і налипання під час тертя в будь-якому поєднанні з матеріалами пари тертя. Коефіцієнт тертя технічного титану в однойменній парі і в парах з іншими металами під час тертя ковзання на повітрі коливається в межах 0,48—0,68. Причому легування титану як α , так і β -стабілізуючими елементами, термічна обробка титанових сплавів незначно підвищують стійкість до схоплення і знижують коефіцієнт тертя.

Відомо, що високу корозійну стійкість титану і його сплавів обумовлює наявність на поверхні плівки оксиду TiO₂. Завдяки високій хімічній активності титану до кисню окисна плівка здатна швидко поновлюватись під час утворення ювенільної поверхні навіть за звичайних температур.

Швидкість процесів руйнування і утворення окисної плівки під дією сил тертя при терті ковзання визначає тривалість так званого «латентного» періоду до настання схоплення, який залежить від питомого навантаження, швидкості ковзання, шорсткості поверхні спряжених деталей, температури експлуатації. Важливим фактором у цьому процесі є також ступінь відкритості вузла тертя, який визначається коефіцієнтом перекриття площі контакту спряжених деталей.

Природа низької зносостійкості і схильності до схоплення титану і його сплавів при терті ковзання нині з'ясована недостатньо повно, і в літературі наводяться різні уявлення про механізм і

фактори, які обумовлюють низькі антифрикційні властивості титанових сплавів. Так, у праці [4] низька зносостійкість титану пояснюється особливостями будови кристалічної ґратки α – Ti, яка забезпечує в процесі пластичного деформування при терті ковзання відразу по декількох площинах, що викликає нагромадження дефектів типу вакансій і значну активацію поверхневих шарів, тобто збільшення внутрішньої енергії. Зменшення накопиченої внутрішньої енергії (пасивація) проявляється в схопленні шляхом взаємної дифузії атомів контактуючих металів по вакансійному механізму, в результаті чого в місцях контакту формуються спільні ґратки контактуючих металів.

Високу схильність до схоплення і низьку зносостійкість титанових сплавів автори пояснюють низькою міцністю вторинних структур, які утворюються на їх поверхні в процесі тертя. За допомогою просвічуваної електронної мікроскопії і мікродифракції ними встановлено, що на відміну від вторинних структур, які утворюються на сталі, міді і алюмінію, вторинні структури на титані не мають явно вираженої текстури і відрізняються значно більшою товщиною і меншою дисперсністю, що пояснюється високою рухомістю атомів кисню в α – Ti.

Поряд з зазначеними факторами значний вплив на триботехнічні показники титану і його сплавів мають їх фізико-хімічні властивості — низька теплопровідність (теплопровідність титану в чотири рази нижча теплопровідності заліза і в 15 разів менша теплопровідності алюмінію), висока хімічна активність і здатність у великій кількості поглинати кисень, азот і водень.

Низька теплопровідність утруднює процес відведення тепла, яке виділяється при терті, з поверхні в об'єм деталі, в результаті чого значно зростає температура в зоні контакту. Цей процес може мати подвійний вплив. З одного боку, зростання температури сприяє окисненню й утворенню на поверхні деталі захисної оксидної плівки, що в деяких випадках може бути фактором зниження інтенсивності зношування, з іншого боку, великий градієнт температури в поверхневому шарі є фактором утворення додаткових термічних напружень і, відповідно, збільшення інтенсивності зношування.

Процес насичення приповерхневих шарів титану під дією високих контактних температур і трибоактивації приводить до підвищення твердості і окрихчування матеріалу. Так, вміст водню в α – Ti понад 0,0015 % веде до утворення так званої водневої крихкості. З цього погляду зростання твердості і крихкості поверхневого шару за рахунок насичення газами при терті є негативним і буде призводити до зростання зносу, особливо при великих питомих напруженнях на плямах фактичного контакту і ударних навантаженнях.

Схильність до схоплення, низька стійкість до зношування при терті як в однойменних парах, так і в парі з іншими матеріалами, високий коефіцієнт тертя і низька ефективність змащування матеріалів є причиною того, що титанові сплави безпосередньо без відповідних захисних покриттів не використовуються як конструкційні для деталей вузлів тертя.

Різноманітність силових, контактних, температурних, корозійних та інших умов роботи деталей різних вузлів, систем і агрегатів повітряних суден і авіаційних ГТД приводить до різних процесів, які відбуваються як на поверхні, так і в об'ємі деталей і утворюючих різні за характером пошкодження та дефекти, в тому числі обумовлюють різні процеси, які відповідають за механізм та характер зношування.

Проведений аналіз причин пошкодження деталей вузлів тертя АТ показав [5], що проблема забезпечення зносостійкості деталей із титанових сплавів як при виробництві, так і під час ремонту АТ є актуальною і потребує подальшого дослідження. Вона актуальна також і для інших споріднених галузей техніки, де заміна традиційних конструкційних сплавів сплавами на основі титану дає значні техніко-економічні переваги при створенні нових зразків техніки, але використання титанових сплавів обмежується або унеможливується їх низькими антифрикційними властивостями і зносостійкістю при будь-яких умовах тертя та зношування, насамперед, у вузлах тертя, де об'єктивно існують умови для розвитку фретинг-корозії.

Найбільш ефективним способом підвищення триботехнічних властивостей деталей є нанесення захисних покриттів, зокрема методом електроіскрового легування (ЕІЛ), який відрізняється технологічною простотою, низькою енергомісткістю, високою міцністю зчеплення покриття з основою і можливістю отримання багатofункціональних градієнтних шарів з дискретною структурою і змінним по товщині фазовим складом.

Традиційними матеріалами для створення зносостійких покриттів на титанових сплавах є тугоплавкі з'єднання титану з киснем, азотом, вуглецем [6].

Недоліком матеріалів, що містять титан є схильність титану до утворення крихкотілих оксидних плівок у процесах стаціонарного окиснення та трибоокиснення. Крихкотіла плівка оксиду титану має в 1,6 разу більший питомий об'єм, ніж матеріал покриття. Згідно з критерієм Пілінга—Бедвардса, такі плівки є нещільними і не захищають поверхню від окиснення [7]. Це призводить до руйнування вторинних структур та їх винесення із зони трибоконтракту. У зв'язку з цим цікаво дослідити, як впливають на триботехнічні властивості титанових сплавів покриття

із тугоплавких сполук цирконію, який на відміну від титану, при окисненні утворює щільний шар оксиду ZrO_2 . Крім того, кераміка на основі ZrB_2 із жаростійкими кремнійвміщувальними домішками розглядається як перспективний матеріал, стійкий до високотемпературного окиснення (до 1600°C). Перспективність використання матеріалів на основі ZrB_2 було доведено на прикладі отримання зносостійких ЕІЛ-покриттів із них на сталях та алюмінієвих сплавах [8; 9]. Оскільки Ti та Zr є ізоелектронними та ізоструктурними елементами, можна очікувати змочуваності титаном тугоплавких з'єднань цирконію, що необхідно для міцного адгезійного зв'язку в системі ZrX - Ti -сплав ($X = B, C, N$).

Із тугоплавких сполук титану та цирконію становлять інтерес бориди завдяки їх підвищеній твердості. Близькість коефіцієнта лінійного теплового розширення титану та боридних фаз (TiB_2 та ZrB_2) дасть змогу уникнути напружень на межі покриття—підкладка при підвищених температурах: $\alpha_{Ti} = 9,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_{TiB_2} = 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_{ZrB_2} = 5,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_{AlN} = 5,98 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. При цьому менша різниця в величині α для Ti та ZrB_2 ($3,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), Ti та AlN ($3,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), порівняно з Ti та TiB_2 ($4,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), дає змогу віддати перевагу дибориду цирконію та нітриду алюмінію.

У складі покриттів високою зносостійкістю відрізняються також композиційні матеріали на основі карбиду вольфраму WC і карбиду хрому Cr_2C_3 .

У зв'язку з вищезазначеними принципами для дослідження формування зносостійких покриттів на титанових сплавах методом ЕІЛ вибрані композиції на основі ZrB_2 , AlN , TiN , WC і Cr_2C_3 з таких систем:

1. ЦБСАН ($AlN - ZrB_2$ на основі AlN).
2. ЦЛАБ — 2 ($ZrB_2 - ZrSi_2$ на основі $ZrBr_2$ з домішкою LaB_6).

3. ЦЛАБ — 3 ($ZrB_2 - ZrSi_2$ на основі ZrB_2 з домішкою SiC).

4. ТАН ($TiN - AlN$ (1:1)).

5. КХНТ — НХ ($TiN - Cr_2C_3$) + $NiCr$.

6. Шарувате покриття ЦЛАБ — 2 / ЦЛАБ — 2 + $NiCr$ / НИАТ — 5 / ЦЛАБ — 2 + $NiCr$ / НИАТ — титановий сплав.

7. ВКЗ (сплав становить 97 масову частку % WC + 3 масову частку % Co).

Електродні матеріали систем ЦБСАН, ЦЛАБ — 2, ЦЛАБ — 3, ТАН, КХНТ — НХ розроблені Інститутом проблем матеріалознавства НАН України.

Шарувате розкриття отримували при пошаровому легуванні матеріалами ЦЛАБ — 2, ЦЛАБ — 2 + $NiCr$ і металевими сплавами 11X15H25M6AG2- (НИАТ-5) системи $Fe - Ni - Cr$.

Покриття наносили на зразки із титанового сплаву ВТЗ-1 з використанням установки електроіскрового легування «Елітрон»-21, у режимі: струм короткого замикання $I_{кз} \leq 1A$, частота вібрації електроду $f = 1200$ Гц, енергія імпульсу $E_{имп.} = 0,08$ Дж, час обробки $t = 2 - 7$ хв/см².

Такий режим обробки забезпечує для всіх досліджуваних електродних матеріалів сталість процесу масоперенесення матеріалу електрода на поверхню підкладки, що проявляється у збільшенні товщини нарощуваного покриття в часі.

Зразки з покриттями випробували на фретинг-корозію під час тертя без мастильного матеріалу на повітрі в системі однойменних пар «покриття—покриття» і в парі «покриття—сталь 45» при таких параметрах віброконтактного навантаження:

- амплітуда відносного віброконтактного ковзання $A - 87$ мкм;
 - частота коливань $\nu - 25$ Гц;
 - питома контактне навантаження $P - 19,8$ МПа;
 - кількість циклів віброколивань $N - 5 \cdot 10^5$ цикл.
- Результати випробувань зразків з досліджуваними варіантами покриттів подано на рис 1.1, 1.2.

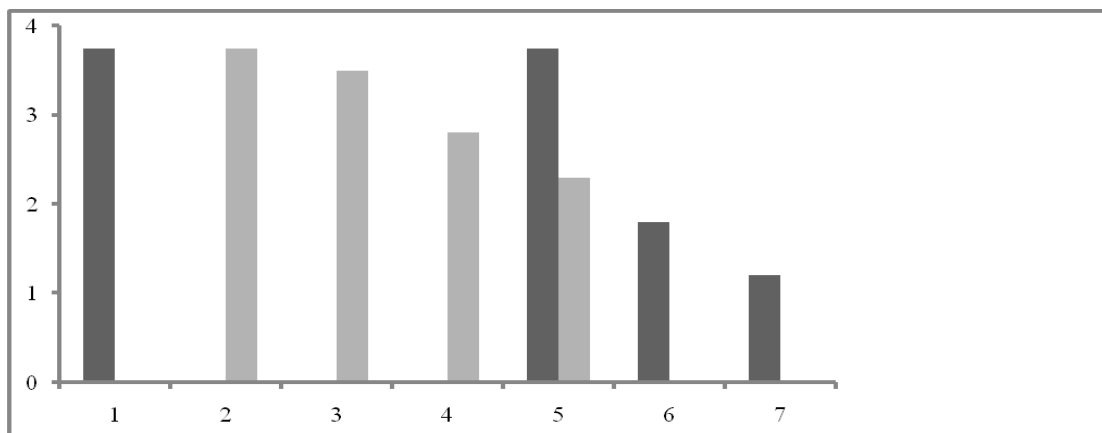


Рис. 1. Гістограма зносу ЕІЛ-покриттів в умовах фретинг-корозії без змащування для пари тертя «покриття—покриття»: ■ — структурно-однорідні покриття; ■ — глобулярні покриття

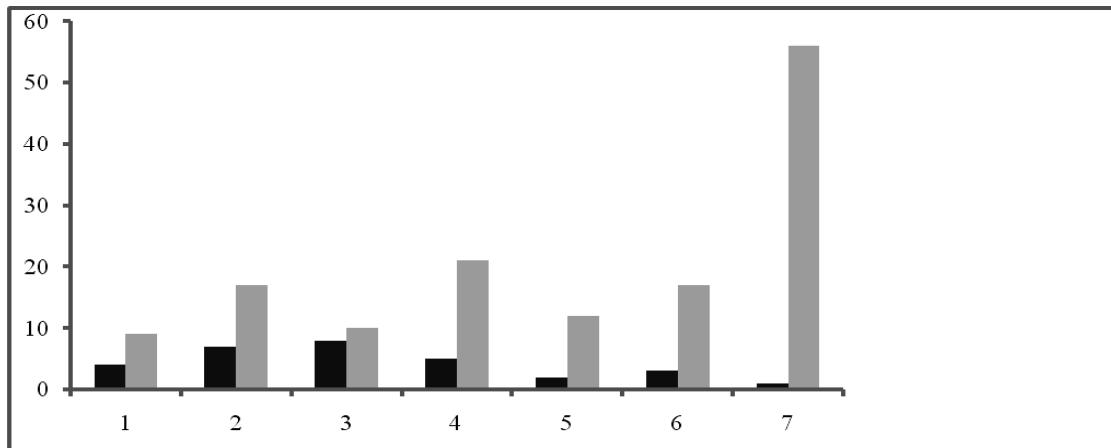


Рис. 2. Гістограма зносу ЕІЛ-покриттів в умовах фретинг-корозії без змащування для пари тертя «покриття—сталь 45»: ■ — ЕІЛ-покриття; ■ — сталь 45 (контртіло)

Висновок

Обґрунтовано вибір матеріалів для нанесення функціональних покриттів на титанові й алюмінієві сплави. Доведено, що перспективними матеріалами для формування зносостійких покриттів методом електроіскрового легування є композиційні керамічні матеріали на основі дибориду цирконію ZrB_2 , і нітриду алюмінію AlN .

На підставі триботехнічних досліджень встановлено істотне підвищення зносостійкості титанових сплавів завдяки нанесенню електроіскрових композиційних покриттів в умовах фретинг-корозії. Електроіскрові покриття на титановому сплаві ВТЗ-1 із композиційної кераміки на основі тугоплавких сполук титану і цирконію забезпечують під час тертя без мастильного матеріалу збільшення зносостійкості в 1,6—3 рази порівняно з покриттями із карбидовольфрамового твердого сплаву. Перспективним способом підвищення зносостійкості і товщини таких покриттів (з метою відновлення деталей) є пошарове електроіскрове легування, яке передбачає перемежування м'якої (металевий сплав) і твердої (керамічний композиційний матеріал) фаз в структурі покриття.

ЛІТЕРАТУРА

1. Трофимов В. А. Особенности применения высококоррозионных материалов в самолетных конструкциях АН / В. А. Трофимов, И. Г. Лавренко, Е. Т. Василевский и др. // Технологические системы. — 2006. — № 4. — С. 38—47.
2. Трофимов В. А. Обеспечение надежности и долговечности подвижных соединений шасси, вы-

полненных из титановых сплавов / В. А. Трофимов, В. М. Борецкий // Технологические системы. — 2002. — № 5. — С. 56—65.

3. Богуслав А. В. Особенности разрушения межпазовых выступов дисков из титановых сплавов компрессоров ГТД при их эксплуатации / А. В. Богуслав, А. Я. Качан, Д. А. Долматов, В. А. Малютин // Технологические системы. — 2003. — № 3. — С. 38—41.

4. Носовский И. Г. О механизме схватывания металлов при трении / И. Г. Носовский // Трение и износ. — 1993. — Т. 14. — № 4. — С. 19—24.

5. Духота О. І., Кіндрачук М. В., Лабунець В. Ф. Проблемні питання використання титанових сплавів в вузлах тертя авіаційної техніки // проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. — К. : НАУ, 2008. — Вип. 49. — Т. 1. — С. 14—26.

6. Федірко В. М. Формування на титані функціональних покриттів на основі сполук втілення за термодифузійного насичення / В. М. Федірко, І. М. Погрелюк, О. І. Яськів // Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 2006. — Т. 42. — № 3. — С. 5—16.

7. Кубашевский О. Окисление металлов и сплавов / О. Кубашевский, Б. Гипкинс. — М. : Иностранная литература, 1995. — 311 с.

8. Подчерняева И. А. Износостойкие слоистые электроискровые покрытия на основе ZrB_2 / И. А. Подчерняева, О. Н. Григорьев, В. Н. Субботин и др., // Порошковая металлургия. — 2004. — № 7/8. — С. 77—81.

9. Подчерняева И. А. Структурообразование и массоперенос износостойких покрытий при электроискровом легировании Al-Si-сплавов композиционной керамикой LaB_6-ZrB_2 / И. А. Подчерняева, А. Д. Панасюк, С. С. Затуловский и др., // Сверхтвердые материалы. — 2003. — № 6. — С. 50—59.

Стаття надійшла до редакції 7.12.09.