

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний авіаційний університет

А. П. Кудрін, О. І. Духота,
М. В. Кіндрачук, Г. М. Зайвенко

ОРГАНІЗАЦІЯ
ТА ТРИБОТЕХНОЛОГІЇ
АВІАРЕМОНТНОГО
ВИРОБНИЦТВА

Монографія

Київ 2015

УДК 629. 735. 083:621.891(02)
ББК 053 - 083
О641

Автори: *А. П. Кудрін, О. І. Духота,
М. В. Кіндрачук, Г. М. Зайвенко*

Рецензенти: *Дмитрієв С. О.* – д-р техн. наук, проф., заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії України, завідувач кафедри забезпечення льотної придатності авіаційної техніки Національного авіаційного університету;
Лобода П. І. – д-р техн. наук, проф., член-кореспондент НАН України, декан інженерно-фізичного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»

Затверджено методично-редакційною радою Національного авіаційного університету (протокол № 10 від 18.12.2013 р.).

Кудрін А. П.

О641 Організація та триботехнології авіаремонтного виробництва /
А. П. Кудрін, О. І. Духота, М. В. Кіндрачук, Г. М. Зайвенко. – К. : НАУ,
2015. – 212 с.

ISBN

Висвітлено загальні питання щодо організації і технологічної підготовки машинобудівних підприємств до випуску продукції. Розглянуто особливості підготовки авіаремонтних підприємств до ремонту авіаційної техніки, методи організації технологічного процесу ремонту. На основі узагальнення вітчизняного і закордонного досвіду проаналізовано перспективні напрями розвитку авіаремонтного виробництва. Розглянуто основні види дефектів, закономірності зношування деталей авіаційних трибосистем, перспективні технологічні методи їх поверхневого зміцнення та відновлення під час ремонту.

Для інженерно-технічних працівників авіаремонтних та авіабудівних підприємств, а також, науковців, аспірантів та студентів, що займаються питаннями виробництва, технічного обслуговування і ремонту авіаційної техніки та трибології.

**УДК 629. 735. 083:621.891(02)
ББК 053 - 083**

ISBN

© А. П. Кудрін, О. І. Духота, М. В. Кіндрачук,
Г. М. Зайвенко, 2015.
© НАУ, 2015

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	7
Розділ 1. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ОСВОЄННЯ ВИПУСКУ ПРОДУКЦІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ І ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА	8
1.1. Етапи освоєння і випуску промислової продукції	8
1.2. Характеристика процесу освоєння виробництва і методи організації переходу підприємства на випуск нової продукції	10
1.3. Основні завдання і положення технологічної підготовки виробництва.....	16
Розділ 2. ОРГАНІЗАЦІЙНІ ОСНОВИ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА ДО РЕМОНТУ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ ...	19
2.1. Особливості організації і технології ремонту авіаційної техніки	19
2.2. Організаційно-виробнича структура авіаремонтного підприємства. Виробничий і технологічний процеси ремонту	29
2.3. Загальні організаційно-технічні заходи щодо підготовки виробництва до ремонту авіаційної техніки.....	32
2.4. Функції і завдання технологічної підготовки авіаремонтного виробництва	38
2.5. Забезпечення технологічності конструкції об'єктів ремонту	40
2.6. Порядок розроблення технологічного процесу ремонту авіаційної техніки	48
2.7. Вибір принципу організації виконання і схеми технологічного процесу ремонту	51
Розділ 3. ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ОРГАНІЗАЦІЇ РЕМОНТУ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ	58

**Розділ 4. ХАРАКТЕРНІ ДЕФЕКТИ ДЕТАЛЕЙ І ЕЛЕМЕНТІВ
КОНСТРУКЦІЙ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН ТА
АВІАДВИГУНІВ 63**

**Розділ 5. АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ФРИКЦІЙНО-КОНТАКТНОЇ
ВЗАЄМОДІЇ ТА ОСНОВНИХ ВИДІВ ЗНОШУВАННЯ
ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНИХ ТРИБОСИСТЕМ 72**

- 5.1. Структура і функції трибологічних систем..... 72
- 5.2. Загальні уявлення про механізм зовнішнього тертя та зношування металів 79
- 5.3. Основні види зношування деталей авіаційних трибосистем 86
- 5.4. Особливості зношування металів в умовах тертя кочення 98
- 5.5. Механізм та закономірності ерозійного зношування103
- 5.6. Особливості розвитку контактних пошкоджень фретинг-корозією110
 - 5.6.1. Механізм і основні закономірності зношування металів в умовах фретинг-корозії110
 - 5.6.2. Вплив фретинг-корозії на втомну міцність металів..121
 - 5.6.3. Діагностування фретинг-корозійних пошкоджень125
- 5.7. Критерії граничного і допустимого зносу елементів трибосистем та оцінювання працездатності матеріалів контактних пар136

**Розділ 6. ПРОГРЕСИВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ
ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ
ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНИХ ТРИБОСИСТЕМ144**

- 6.1. Загальні структурно-реологічні принципи створення поверхнево-зміцнених шарів та захисних покриттів.....144
- 6.2. Аналіз перспективних технологій поверхневого зміцнення і відновлення типових деталей вузлів тертя авіаційних конструкцій.....151
- 6.3. Перспективні напрями розвитку технологій створення високотемпературних зносостійких матеріалів.....164

6.4. Особливості технології відновлення зношених деталей із титанових сплавів.....	170
6.5. Технологічні методи підвищення втомної міцності деталей з газотермічними покриттями	181
6.6. Прогресивні технології безрозбірного відновлення прецезійних пар тертя	185
СЛОВНИК ТЕРМІНІВ	190
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	200

ОСНОВНІ УМОВНІ СКОРОЧЕННЯ

АД – авіаційний двигун

АТ – авіаційна техніка

ГТД – газотурбінний двигун

ДП – детонаційні покриття

ЄСТПВ – Єдина система технологічної підготовки виробництва

ККД – коефіцієнт корисної дії

НДР – науково-дослідна робота

ПС – повітряне судно

ППД – поверхнево-пластичне деформування

САО – струминно-абразивне оброблення

ТО – технічне обслуговування

ТПВ – технологічна підготовка виробництва

ФАБО – фінішне антифрикційне безабразивне оброблення

ТП – технологічний процес

ПЕРЕДМОВА

На сучасному етапі розвитку технічного прогресу в умовах постійно зростаючих цін на продукцію авіабудування питанням підтримання і відновлення льотної придатності авіаційної техніки (АТ) надається виключно важливе значення. Ключове місце щодо вирішення цього завдання належить ремонту.

Своєчасний і якісний ремонт дозволяє запобігти виникненню несправностей і відмов, продовжити ресурс, забезпечує можливість безпечної експлуатації АТ протягом усього призначеного, як правило, тривалого строку служби. Підвищення ефективності і якості ремонту діючого парку, освоєння ремонту нових типів повітряних суден (ПС) і авіадвигунів (АД), упровадження нових прогресивних технологічних процесів ремонту потребують здійснення комплексу організаційно-технічних і технологічних заходів щодо підготовки авіаремонтного виробництва. Головне завдання підготовки ремонту та подальшого удосконалення ремонту полягає у виборі найбільш ефективних, науково-обґрунтованих способів і технологій ремонту, визначенні оптимальних принципів і методів організації виробничого процесу та методів організації праці.

Особливістю конструкції сучасних ПС і АД є велика кількість рухомих і номінально-нерухомих вузлів та з'єднань, деталі яких під час експлуатації піддаються тертю та зношуванню. Недостатня зносостійкість багатьох із таких деталей обмежують ресурс, знижують експлуатаційну надійність і є однією з основних причин, що викликають необхідність ремонту. У зв'язку з цим у процесі як виробництва, так і ремонту АТ значна увага приділяється конструктивно-технологічному забезпеченню зносостійкості деталей авіаційних трибосистем, розробленню та впровадженню у практику ремонту ефективних методів відновлення зношених деталей.

З огляду на актуальність окреслених завдань з підвищення ефективності і якості ремонту АТ видання мало за мету охопити коло питань, пов'язаних з особливостями організації та підготовки авіаремонтного виробництва, сучасними підходами до удосконалення технологічного процесу ремонту та триботехнологічного забезпечення працездатності деталей авіаційних трибосистем.

Розділ 1. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ОСВОЄННЯ ВИПУСКУ ПРОДУКЦІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ І ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА

1.1. Етапи освоєння і випуску промислової продукції

Розвиток науково-технічного прогресу в галузі машинобудування потребує постійного розроблення і впровадження нових видів техніки, принципово нових технологій, підвищення технічного рівня і організації виробництва, що диктується в умовах сучасної ринкової економіки необхідністю випуску продукції найвищого рівня якості, конкурентоспроможної на світовому ринку. Це спонукає до більш швидкого оновлення і постійної модернізації продукції машинобудування, у тому числі всіх видів АТ.

Життєвий цикл промислової продукції щодо її виробництва охоплює період від початку промислового випуску до повного припинення виробництва даного виробу і умовно поділяється на п'ять етапів (рис. 1.1) [1]: освоєння виробництва; нарощування обсягу випуску продукції; етап сталого обсягу випуску продукції; падіння обсягу випуску продукції; зняття виробу з виробництва.

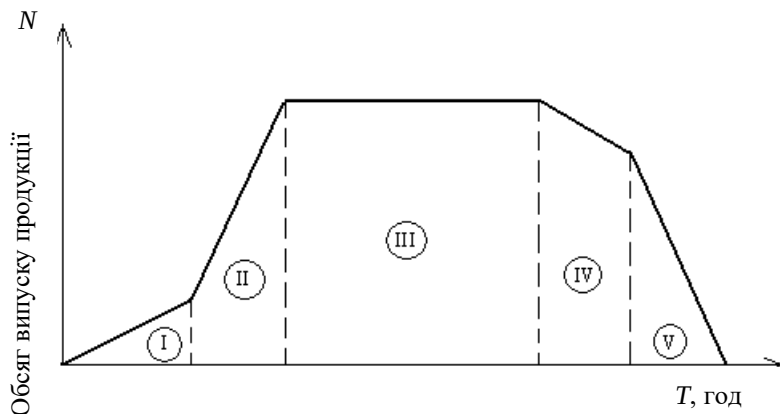


Рис. 1.1. Характерні етапи промислового виробництва продукції

Перший етап – етап освоєння виробництва – характеризується високою собівартістю продукції і відповідно низькою економічною ефективністю виробництва. Це зумовлено складністю самого процесу освоєння випуску нового виробу, малими обсягами виробництва і відповідно високими затратами на одиницю продукції. Етапу освоєння виробництва безпосередньо передує підготовка підприємства до переходу на випуск нового виду виробу.

Другий етап – етап нарощування обсягу випуску продукції характеризується різким нарощуванням обсягу випуску продукції, зниженням її собівартості і ростом економічної ефективності виробництва.

Третій, найбільш тривалий етап – етап сталого випуску продукції. Цей етап характеризується досягненням максимального планового обсягу випуску продукції, а відповідно і мінімальних показників її собівартості та максимальної економічної ефективності виробництва.

Четвертий і п'ятий етапи – етапи падіння обсягу випуску продукції і зняття виробу з виробництва – пов'язані із втратою споживчих властивостей продукції. Ці етапи характеризуються поступовим спадом обсягів випуску продукції аж до повного припинення виробництва виробу. Для своєчасного переходу підприємства на випуск нової продукції уже на цих етапах повинна інтенсивно проводитись підготовка до освоєння виробництва нового, більш досконалого виробу.

Створенню, наступному освоєнню і промислового виробництва нових видів продукції передує проведення широкомасштабних фундаментальних, пошукових і прикладних науково-дослідних робіт (НДР), у ході яких визначаються і відпрацьовуються нові ідеї, принципи, конструктивні і технологічні рішення, спрямовані на забезпечення вищих техніко-економічних показників нового виробу. На основі вихідних вимог, що ставляться до конкретного виробу, розробляється технічне завдання на його створення.

У технічному завданні визначаються цілі і призначення розробки, основні джерела, на яких базується розроблення (НДР, патенти, ліцензії і т.ін.), технічні вимоги до виробу, економічні показники, стадії і етапи розроблення та орієнтовні терміни їх виконання, порядок контролю і приймання продукції тощо.

Технічне завдання є основним документом для виконання проектно-конструкторських робіт, у ході яких розробляється технічна

пропозиція, ескізний і технічний проекти, дослідні зразки і робоча документація. У ході виконання проектно-конструкторських робіт значна увага приділяється уніфікації і стандартизації конструкції виробу, підвищенню її технологічності, техніко-економічній оптимізації конструкторських і технологічних рішень.

1.2. Характеристика процесу освоєння виробництва і методи організації переходу підприємства на випуск нової продукції

Освоєння виробництва – це початковий етап періоду промислового виробництва підприємством продукції. Доцільність виділення цього етапу може відповідати тільки умовам масового і серійного типів виробництва, для яких характерна стабільність номенклатури продукції, що випускається підприємством протягом певного часу [1]. За одиничного типу виробництва етап освоєння не виділяється, оскільки оновлення номенклатури при цьому відбувається з випуском кожного нового одиничного виробу або невеликої партії одиничних виробів.

На етапі освоєння виробництва продовжується конструктивно-технологічне доопрацювання нового виробу, виконується організаційно-технічні заходи щодо пристосування виробництва до випуску нової продукції. На цьому етапі може вноситься значна кількість конструктивно-технологічних змін, які потребують коригування технічної документації, технології і технологічного оснащення виробничих процесів. Унесення змін зумовлює подовження етапу освоєння, збільшення витрат на виробництво і відповідно росту собівартості одиниці продукції. Так, наприклад, навіть незначна зміна конструкції однієї деталі в умовах масового виробництва потребує перегляду всього технологічного процесу її виготовлення, проектування нової оснастки, пристроїв, різального, вимірювального та іншого інструменту, перегляду норм витрат матеріалів і норм витрат часу на виготовлення. Упровадження технології відновлення деталі для ремонту потребує розроблення відповідних технологічних процесів і їх технічного оснащення. У період освоєння виробництва працівникам, особливо тим, що зайняті в основному виробництві, доводиться освоювати нові

технологічні операції і нове обладнання, що потребує певного часу та додаткових витрат.

Основні характеристики процесу освоєння виробництва – тривалість етапу і витрати на освоєння виробництва – залежать від ступеня підготовленості підприємства до серійного або масового виробництва нового виробу, яка включає наявність відповідних технологій, технологічного оснащення, інструменту, виробничих площ тощо. За високого ступеня підготовленості підприємства до випуску нової продукції період освоєння виробництва значно скорочується, знижуються трудоемність і собівартість перших виробів. Водночас високий рівень готовності підприємства до початку стабільного випуску продукції потребує значних капіталоукладень, які не завжди можуть бути економічно виправданими. У зв'язку з цим залежно від типу виробництва для різних видів продукції установлюють раціональні обсяги оснащення підприємства до початку освоєння її виробництва.

Створення і освоєння виробництва нових видів продукції машинобудування і припинення випуску застарілої продукції, що втратила свої споживчі властивості, є закономірним процесом розвитку науково-технічного прогресу. Динаміка процесу заміни застарілої продукції новою, більш прогресивною і досконалою, на сучасному етапі розвитку світової економіки диктується насамперед забезпеченням конкурентоспроможності продукції, а також постійно зростаючими вимогами до ресурсозбереження як на її виробництво, так і на експлуатацію та вимогами екологічної безпеки.

Ефективність процесу оновлення продукції в машинобудуванні здебільшого визначається вибором найбільш раціонального методу переходу на виробництво нових виробів. Методи переходу на випуск нової продукції, що використовуються в машинобудуванні, розрізняються, передусім, ступенем поєднання або наявності перерви у часі між випуском моделі виробу, що підлягає заміні, і моделі, виробництво якої буде освоюватись, а також темпами зниження обсягу випуску продукції, що знімається з виробництва, і темпами нарощування обсягу продукції, що освоюється. У зв'язку з цим можна виділити такі методи переходу підприємству на випуск нової продукції [1]: послідовний, перервно-послідовний, безперервно-послідовний, паралельний, паралельно-послідовний.

За послідовного методу переходу виробництво нової продукції починається після повного припинення випуску продукції, яка знімається з виробництва.

Залежно від перерви між випуском старої продукції і початком випуску нової виділяють два варіанти послідовного методу: перервно-послідовний і безперервно-послідовний.

Перервно-послідовний метод припускає, що після зупинення випуску старого виробу проводяться перепланування виробничих площ, монтаж технологічного обладнання, транспортних засобів під виробництво нового виробу, а після їх завершення починається освоєння його виробництва (рис. 1.2). Тривалість виконання цих робіт та частини робіт з технологічної підготовки виробництва, яка може виконуватись у цей період, визначає проміжок часу ΔT зупинення виробництва, протягом якого підприємство не випускає продукції. В організаційно-технологічному сенсі це найбільш простий варіант переходу підприємства на випуск нової продукції, але він економічно не ефективний через наявність періоду ΔT , коли продукція не випускається, але підприємство зазнає певних витрат з підготовки виробництва.

Безперервно-послідовний метод характеризується тим, що випуск нового виробу починається відразу ж після зупинки випуску виробу, що знімається з виробництва. (рис. 1.3).



Рис. 1.2. Перервно-послідовний метод переходу на випуск нового виробу



Рис. 1.3. Безперервно-послідовний метод переходу на випуск нового виробу

У цьому випадку перехідного періоду між припиненням випуску старої продукції і початком випуску нової продукції немає $\Delta T = 0$, а втрати, пов'язані зі зниженням сумарного темпу випуску продукції, можуть бути значною мірою скомпенсовані високими темпами нарощування обсягів виробництва нових виробів.

Разом з цим освоєння виробництва за безперервно-послідовного методу значно складніше ніж за перервно-послідовного. Безперервно-послідовний метод освоєння випуску нової продукції потребує високого ступеня завершеності всього комплексу робіт з підготовки підприємства до випуску нової продукції. Тому цей метод переходу можливий лише у разі високого рівня уніфікації нового і старого виробів, типізації та стандартизації технологічних процесів і технологічного оснащення.

Паралельним методом переходу передбачається поступова заміна продукції, що знімається з виробництва, на нову, яка освоюється. При цьому зі скороченням обсягу виробництва старої моделі виробу нарощується обсяг виробництва нової моделі.

Залежно від тривалості періоду ΔT , протягом якого поєднується випуск старого і нового виробів, темпів нарощування випуску нового виробу і згортання випуску старого, варіанти паралельного методу переходу можуть бути різними: зі збереженням сумарного обсягу випуску продукції в перехідний період (рис. 1.4); із тимчасовим зниженням сумарного обсягу випуску продукції в перехідний період (рис. 1.5).

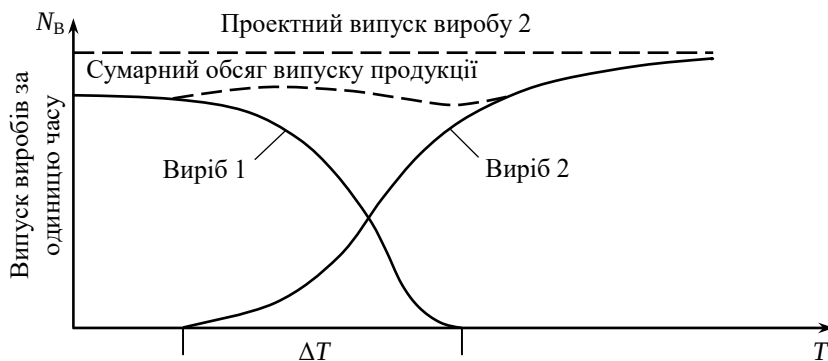


Рис. 1.4. Паралельний метод переходу на випуск нового виробу зі збереженням сумарного обсягу випуску продукції

Перший варіант є більш сприятливим з економічного погляду, оскільки дозволяє підприємству зберегти в період освоєння сумарний обсяг випуску продукції і відповідно значно скоротити втрати. Такий варіант переходу набув широкого застосування в умовах масового виробництва, особливо при реконструкції підприємства. У зв'язку з тим, що трудомісткість нових виробів у період освоєння їх виробництва, як правило, вища ніж виробів, що знімаються з виробництва, такий варіант переходу потребує збільшення виробничих потужностей підприємства і додаткової чисельності виробничих працівників. Якщо умов для введення додаткових потужностей немає, використовують другий варіант паралельного методу переходу з деяким зниженням у період освоєння сумарного обсягу випуску продукції.

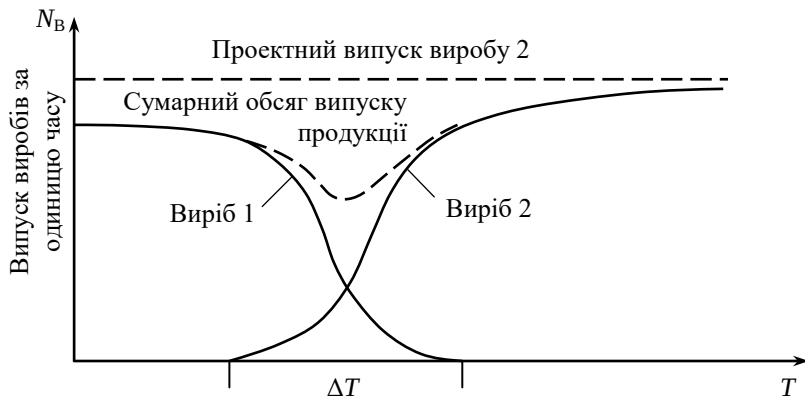


Рис. 1.5. Паралельний метод переходу на випуск нового виробу із тимчасовим зменшенням сумарного обсягу випуску продукції

Різновидом паралельного методу є паралельно-поетапний перехід (рис. 1.6).

Сутність паралельно-поетапного переходу полягає в тому, що продукція оновлюється за декілька етапів, протягом яких підприємство освоює випуск перехідних моделей, які відрізняються від моделі, що замінюється конструкцією окремих вузлів і агрегатів. На кожному з етапів оновлюється не кінцева продукція підприємства, а лише окремі складові частини виробу. Перевагою паралельно-поетапного методу є те, що не потребується корінна реконструкція підприємства, забезпечується на кожному з етапів рівномірний обсяг випуску продукції, знижуються витрати на освоєння виробництва.

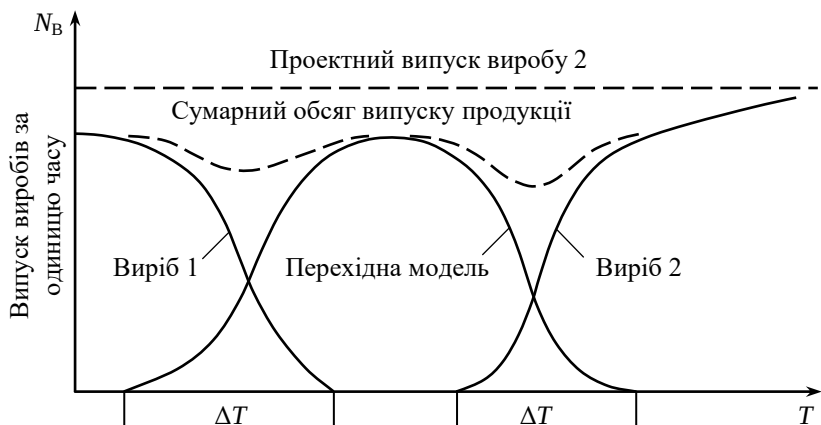


Рис. 1.6. Паралельно-поетапний метод переходу на випуск нової продукції

Паралельно-послідовний метод переходу (рис. 1.7) застосовують для освоєння нових моделей продукції, яка істотно відрізняється за конструкцією від замінної моделі. При цьому методі на підприємстві на етапі підготовки виробництва створюються додаткові виробничі дільниці (цехи), на яких починається освоєння випуску нового виробу, готується персонал, відпрацьовуються технологічні процеси, організовується випуск першої партії продукції. Одночасно з цим у цехах основного виробництва продовжується випуск виробів, які підлягають заміні.

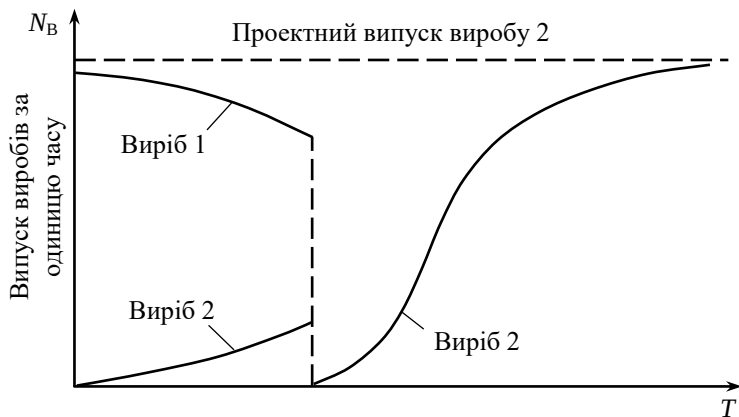


Рис. 1.7. Паралельно-послідовний метод переходу на випуск нової продукції

По закінченні початкового періоду освоєння відбувається короткотермінове зупинення виробництва як нової продукції, так і продукції, що знімається з виробництва. У цей період переплановуються всі виробничі дільниці, установлюється і налагоджується необхідне обладнання і після завершення цих робіт починається випуск нової продукції.

Недоліком паралельно-послідовного методу освоєння є втрати, спричинені припиненням випуску продукції під час зупинки виробництва, і втрати, зумовлені зменшенням сумарного обсягу випуску продукції на початку періоду освоєння випуску нового виробу в цехах основного виробництва. Крім цього, підприємство повинно мати резервні виробничі площі для організації тимчасових дільниць, на яких на першому етапі починається освоєння виробництва нового виробу.

Виконання робіт початкового етапу освоєння на додаткових дільницях дозволяє забезпечити високі темпи нарощування випуску нової продукції на етапі запуску основного виробництва.

1.3. Основні завдання і положення технологічної підготовки виробництва

Освоєння випуску (ремонту) нової продукції потребує виконання комплексу робіт конструкторського, технологічного, організаційного і економічного характеру, основою реалізації яких є технологічна підготовка виробництва (ТПВ).

Згідно з визначеною державним стандартом термінологією ТПВ – це сукупність заходів, що забезпечують технологічну готовність виробництва. У ході ТПВ підприємство повинно бути забезпечене повним комплектом конструкторської і технологічної документації, технологічного оснащення, виробничих площ, робітників, матеріалів, необхідних для випуску (ремонту) заданого обсягу продукції з установленими техніко-економічними показниками і показниками якості.

Організація і керування процесами ТПВ регламентується державними стандартами єдиної системи технологічної підготовки виробництва (ЄСТПВ), яка визначає завдання і порядок виконання комплексу робіт з ТПВ.

Єдина система технологічної підготовки виробництва – це установлена державними стандартами система організації і керування проце-

сом ТПВ, яка передбачає широке використання технологічної оснастки і обладнання, засобів механізації і автоматизації виробничих процесів, інженерно-технічних і управлінських робіт.

Єдина система технологічної підготовки виробництва поширюється на діяльність міністерств, відомств, підприємств і організацій, які здійснюють ТПВ виробів машинобудування, приладобудування і засобів автоматизації. Основне призначення ЄСТПВ полягає в установленні системи організації і керування процесом ТПВ, яка забезпечує:

- єдиний для всіх підприємств системний підхід до вибору та застосування методів і засобів ТПВ, які відповідають передовим досягненням науки, техніки і виробництва;
- освоєння виробництва і випуску виробів вищої категорії якості в мінімальні терміни, за мінімальних трудових затрат на всіх стадіях створення виробів, включаючи дослідні зразки (партії), а також виробів одиничного виробництва;
- організацію виробництва високого ступеня гнучкості, яка дає змогу безперервного його удосконалення і швидкого переналадження на випуск нових виробів;
- раціональну організацію механізованого і автоматизованого виконання комплексу інженерно-технічних і управлінських робіт;
- взаємозв'язки ТПВ і керування нею з іншими системами і підсистемами керування.

Стандартами ЄСТПВ встановлюються основні вимоги до ТПВ, порядок організації науково-технічних розробок у галузі ТПВ, приймання і передачі їх у виробництво, правила організації і управління процесом ТПВ, правила забезпечення технологічності конструкції виробів, правила розроблення і використання технологічних процесів та засобів технологічного оснащення, правила використання технічних засобів механізації і автоматизації інженерно-технічних робіт.

Для врахування особливостей ТПВ, зумовлених конструктивно-технологічними особливостями виробів і типом виробництва на основі ЄСТПВ, розробляються галузеві системи ТПВ.

Система ТПВ підприємства встановлюється нормативно-технічною документацією підприємства, яка розробляється відповідно до стандартів ЄСТПВ і галузевих стандартів.

Технологічна підготовка виробництва повинна здійснюватись у відповідності з правилами та положеннями, установленними

ЕСТПВ, і починатися з отримання вихідних документів на розроблення і виробництво нових виробів, організацію нового та удосконалення діючого виробництва. Основними завданнями ТПВ є:

- забезпечення технологічності конструкції виробу;
- розроблення технологічних процесів;
- проектування і виготовлення засобів технологічного оснащення;
- організація і керування процесом ТПВ.

На рівні підприємства забезпечення технологічності конструкції передбачає проведення технічного контролю конструкторської документації, оцінювання рівня технологічності конструкції виробу, опрацювання конструкції виробу на технологічність та внесення необхідних змін у конструкцію виробу і в технологічну документацію.

Розроблення технологічних процесів передбачає розроблення, стандартизацію і використання типових технологічних процесів, технологічних процесів з використанням групових методів оброблення і технологічних процесів на деталі, складальні одиниці.

Проектування і виготовлення технологічного оснащення передбачає уніфікацію засобів технологічного оснащення, організацію їх застосування, у тому числі уніфікованих і стандартизованих засобів оснащення, а також використання загальнодержавних і галузевих баз прокату цих засобів, проектування і виготовлення спеціальних засобів технологічного оснащення.

Організація і керування процесом ТПВ передбачає перспективне, щорічне та поточне планування розвитку і вдосконалення ТПВ на підприємстві, використання сучасних методів вирішення завдань ТПВ із застосуванням засобів механізації і автоматизації інженерно-технічних і управлінських робіт, організацію і удосконалення структури служб, які здійснюють ТПВ.

Основою прискореного освоєння випуску нової АТ і відповідно в подальшому освоєння її ремонту є постійне удосконалення системи ТПВ АТ і технологічної підготовки авіаремонтного виробництва, забезпечення на етапі проектування високої технологічності конструкції і ремонтної технологічності ПС, АД та окремих їх вузлів і агрегатів, упровадження прогресивних технологій виробництва і ремонту АТ, прогресивних методів організації технологічних процесів і керування виробництвом.

Розділ 2. ОРГАНІЗАЦІЙНІ ОСНОВИ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА ДО РЕМОНТУ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

2.1. Особливості організації і технології ремонту авіаційної техніки

Завдяки досягненням науки, техніки і технології у галузі літако- та авіадвигунобудування сучасна АТ має високий рівень надійності і відповідно високі ресурси. Але яким би досконалим не було б конструктивне і технологічне забезпечення надійності та працездатності окремих складових частин і в цілому ПС та АД, у процесі експлуатації через об'єктивні причини, такі як процеси старіння матеріалів, зношування, корозії, нагромадження втоми, змінюються форма і розміри робочих поверхностей деталей, порушуються їх взаємне розташування та початково встановлені зазори і натяги в спряженнях, втрачаються пружність, міцність та інші властивості матеріалу деталей, виникають різного роду пошкодження і дефекти.

У певний момент часу настає такий стан, коли в результаті втрати працездатності функціональних елементів подальша експлуатація ПС, АД або їх окремих систем і агрегатів стає неможливою або економічно недоцільною.

Стан, коли подальша експлуатація машини стає неможливою або економічно недоцільною, називається граничним станом. У разі досягнення граничного стану машина втрачає працездатність, стає несправною і її експлуатація повинна бути припинена.

Під працездатним станом розуміють такий стан об'єкта (машини, вузла, агрегату), за якого значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати об'єктом задані функції, відповідають вимогам нормативно-технічної і (або) конструкторської документації.

Несправний стан (несправність) – це такий стан об'єкта, за якого значення хоча б одного з параметрів, що характеризують здатність об'єкта виконувати задані функції, не відповідає вимогам нормативно-технічної і (або) конструкторської документації.

Подія, яка полягає у порушенні справного стану об'єкта зі збереженням працездатного стану, називається пошкодженням.

Подія, за якої частково або повністю порушується працездатний стан називається відмовою.

Для оцінювання стану деталей використовується термін «дефект», під яким розуміють кожну окремо взятую невідповідність стану виробу (деталі) вимогам нормативно-технічної і (або) конструкторської документації.

Для попередження виникнення несправностей і відмов, підтримання та відновлення працездатного стану АТ протягом експлуатації у період всього призначеного ресурсу або терміну експлуатації повинна проходити різні форми технічного обслуговування і ремонту.

Технічне обслуговування – це комплекс обов’язкових, планомірно виконуваних робіт з підтримання працездатного або справного стану виробу під час його використання за призначенням, зберігання і транспортування.

Технічне обслуговування має профілактичний характер. Основним завданням технічного обслуговування АТ є запобігання виникненню дефектів, несправності і відмови та підтримання необхідного рівня її надійності.

Під ремонтом розуміють комплекс організаційно-технічних і технологічних робіт, які виконуються з метою усунення дефектів і відновлення справного або працездатного стану і ресурсу виробу або його окремих складових частин.

Ремонту підлягають вироби, зокрема ПС, АД або їх агрегати, які зняті з експлуатації внаслідок відпрацювання ресурсу, або в результаті пошкодження чи дострокового зносу.

Ресурс – це напрацювання об’єкта від початку його експлуатації або відновлення після ремонту до переходу в граничний стан. Напрацювання визначається тривалістю або обсягом роботи об’єкта.

Розрізняють середній ресурс, ресурс до першого ремонту, міжремонтний ресурс і призначений ресурс.

Призначений ресурс – це сумарне напрацювання об’єкта, після якого його експлуатація повинна бути припинена незалежно від технічного стану.

Якщо момент переходу в граничний стан визначається календарною тривалістю експлуатації машини, застосовують термін «строк служби».

Із наведеного визначення ремонту випливає, що призначенням ремонту АТ є відновлення справного або працездатного стану ПС, АД, або їх окремих вузлів, агрегатів чи систем із забезпеченням можливості їх безпечної експлуатації протягом наступного міжремонтного ресурсу та строку служби.

На практиці розрізняють такі види ремонту:

- поточний;
- середній;
- капітальний.

Завданням поточного ремонту є забезпечення та підтримання справності АТ протягом відпрацювання міжремонтного ресурсу. Поточний ремонт виконується силами авіаційно-технічної бази, для чого в її складі передбачено цех (дільницю) поточного ремонту. Під час поточного ремонту несправності усувають регулюванням, заміною або відновленням окремих деталей, вузлів і агрегатів за умови, що всі інші частини ПС чи АД, які не досягли граничного стану, мають запас ресурсу не менший, ніж до наступного ремонту.

Середній ремонт проводиться з метою відновлення експлуатаційних характеристик ПС і АД заміною або відновленням зношених або пошкоджених складових частин. Під час середнього ремонту проводиться часткове розбирання виробу з перевіркою технічного стану окремих складових частин і усуненням виявлених несправностей. Під час середнього ремонту може проводитися також капітальний ремонт окремих складових частин ПС і АД.

Капітальний ремонт виконують для відновлення справного стану і повного (або близького до повного) відновлення ресурсу виробу. Комплекс робіт, виконуваних під час капітального ремонту, характеризується повним розбиранням ПС і АД, перевіркою технічного стану всіх складових частин і деталей, у тому числі базових, заміною всіх зношених деталей і складових частин новими або відремонтованими з наступним складанням, обкатуванням, комплексним випробуванням і регулюванням окремих складових частин, складанням, обкатуванням і випробуванням усього виробу в цілому.

Середній і капітальний ремонт АТ, як правило, виконується на спеціалізованих авіаремонтних підприємствах. В останній час практикується виконання всіх видів ремонту заводом-виробником АТ.

Оскільки капітальний ремонт являє собою найбільш складний і трудомісткий процес, надалі, насамперед, будемо розглядати цей вид ремонту.

Проведення капітальних ремонтів поряд з відновленням льотної придатності ПС і АД дає можливість:

- запобігати передчасному і непередбачуваному виникненню відмов і несправностей;
- використовувати повну довговічність багатьох деталей і в цілому ПС і АД, яка закладена під час їх проектування та виготовлення;
- забезпечувати необхідний рівень надійності АТ для відпрацювання наступного міжремонтного ресурсу;
- підвищувати економічну ефективність використання АТ.

У сучасних умовах ринкової економіки підвищення ефективності авіатранспортної галузі потребує більш інтенсивного використання ПС і АД, тобто зведення до мінімуму всіх їх простоїв, у тому числі простоїв, пов'язаних з виконанням ремонту. Тому зменшення терміну перебування ПС і АД у ремонті і забезпечення високої якості ремонту є важливим техніко-економічним завданням авіаремонтних підприємств. Наприклад, стосовно АД середньомагістральних пасажирських літаків тривалість перебування в ремонті двигуна не повинна перевищувати 5–8 діб. Наднормативне перебування двигуна в ремонті призводить до незапобіжного збільшення парку двигунів, призначених для обслуговування конкретного типу літаків.

Жорсткі вимоги до терміну і якості ремонту потребують відповідної організації всієї системи планування, підготовки й організації виробничого і технологічного процесів ремонту.

Важливим фактором в організації ремонтного виробництва є впроваджена система ремонту.

Системою ремонту називається комплекс організаційно-технологічних положень і норм, які визначають організацію і порядок проведення робіт з ремонту машин та забезпечення передбачених нормативно-технологічною документацією показників якості та ефективності ремонту.

Стосовно АТ можна виділити чотири системи ремонту [2]:

- систему планово-попереджувального ремонту;
- систему регламентних ремонтів;
- систему обслуговування і ремонту за фактичним технічним станом;
- систему ремонту за оптимальними технічно-економічними показниками.

Основними вимогами, які ставляться до будь-якої системи ремонту АТ, є забезпечення у результаті ремонту необхідного рівня надійності, а відповідно і безпеки польотів та ресурсу відремонтованого ПС і АД, мінімально можливої тривалості перебування їх у ремонті та вартості ремонту.

Аналіз нормативно-технічних положень і принципів, покладених в основу систем ремонту АТ, показує, що кожна із цих систем щодо забезпечення нормативно-технічних показників ефективности ремонту має свої переваги і недоліки.

Відповідно до планово-попереджувальної системи ремонту ремонт має профілактичний характер і виконується з метою попередження виникнення несправностей і відмов. Повітряному судну і АД призначаються ресурси до першого капітального ремонту і наступні міжремонтні ресурси, які встановлюють за найбільш «слабкими» місцями, тобто за тими деталями і вузлами, на яких найшвидше розвиваються процеси, що призводять до втрати їх працездатності і які є найбільш імовірними частинами виникнення несправності та відмови ПС і АД. При цьому маються на увазі такі складові частини ПС і АД, або їх окремих вузлів чи агрегатів, усунення дефектів і несправностей яких не може бути виконано в умовах експлуатаційних підприємств через великий обсяг демонтажно-монтажних робіт, регулювань, випробувань або відсутність спеціального обладнання.

Перевагою системи планово-попереджувального ремонту є те, що ця система забезпечує підтримання необхідного рівня надійності АТ, оскільки у процесі ремонту об'єкт ремонту підлягає повному розбиранню, а всі його частини – технічному контролю. Істотний недолік системи планово-попереджувального ремонту – великий обсяг ремонтних робіт, насамперед демонтажно-монтажних, а звідси висока вартість і простої ПС і АД у ремонті.

Система планово-попереджувального ремонту часто замінюється системою регламентних ремонтів, яку також називають системою ремонту за напрацюванням. За цією системою весь обсяг капітального ремонту розбивається на декілька етапів (як правило, не більше чотирьох).

Етапи ремонтів поділяють за напрацюванням через деякі, наперед визначені проміжки часу. На кожному етапі виконується певний, заздалегідь передбачений обсяг постійних ремонтних робіт, який не залежить від технічного стану об'єкта ремонту, і

група змінних робіт, які залежать від виявлених несправностей і дефектів. Оскільки зі збільшенням напрацювання закономірно збільшується потік дефектних деталей, обсяг ремонтних робіт на кожному наступному етапі стає більшим, ніж на попередньому. Ремонтні роботи, виконані на всіх етапах, складають повний обсяг робіт капітального ремонту.

Систему регламентних ремонтів найбільш широко застосовують під час ремонту ПС. Перевагою цієї системи, порівняно з планово-попереджувальною системою, є те, що на кожному етапі виконання ремонту обсяг демонтажно-монтажних, контрольних робіт і робіт, пов'язаних з відновленням деталей та випробуванням об'єкта ремонту, визначається тільки тими несправностями і дефектами, поява яких на певному етапі об'єктивно можлива або виявлена. Застосування системи регламентних ремонтів дає змогу збільшити сумарний міжремонтний ресурс ПС, скоротити термін простою ПС у ремонті, а також сумістити деякі форми технічного обслуговування з ремонтом. Разом з цим ця система ремонту потребує наявності інформації про закономірність виникнення дефектів та несправностей.

Системи планово-попереджувального і регламентних ремонтів натеper уже не можуть задовольняти сучасні вимоги, насамперед вимоги економічної ефективності використання ПС. Для цих систем ремонту характерним є те, що напрацювання до чергового ремонту задається заздалегідь і не враховує технічного стану конкретного виробу. За такого підходу частина АТ може направлятися у ремонт з неповністю використаним ресурсом, коли її технічний стан ще не потребує ремонту. Тому більш економічно доцільною є система ремонту за фактичним технічним станом, яка останнім часом набуває дедалі більшого поширення як для ремонту АТ, так і для інших машин.

Відмітною ознакою системи ремонту за фактичним технічним станом є те, що технічний стан кожного конкретного об'єкта оцінюється у процесі експлуатації і ремонт проводиться при досягненні ним деяких установлених параметрів граничного стану. У цьому випадку ресурси до першого ремонту і наступні міжремонтні ресурси не призначаються. Оскільки вихід виробу в ремонт визначається не за напрацюванням, а за його технічним станом, то ремонт виконується тільки тоді, коли у результаті контролю технічного стану встановлюється потреба в його виконанні.

Перехід на ремонт за фактичним технічним станом скорочує обсяг ремонтних робіт, підвищує ефективність використання АТ. Трудомісткість таких робіт зменшується на 25...30 %, необхідна кількість виробів оборотного фонду скорочується більш ніж у два рази. Найбільш ефективною ця система буде тоді, коли на стадії проектування АТ передбачаються і забезпечуються такі показники експлуатаційної надійності та ремонтної технологічності конструкції, як висока живучість усіх деталей і частин, висока контролепридатність конструкції, легкоснімність і взаємозамінність деталей, вузлів та агрегатів. Значну роль при цьому відіграють забезпечення зручних підходів до об'єктів контролю, скорочення кількості об'єктів контролю, наявність прогнозних параметрів, які визначають зміну технічного стану об'єкта і можливості встановлення достатньої кількості датчиків для їх вимірювання.

Під час проектування та виробництва сучасних ПС і АД дедалі більша увага приділяється їх адаптації до умов обслуговування і ремонту за фактичним технічним станом. Для цього впроваджуються методи конструювання АТ за модульним принципом, постійно проводяться наукові дослідження зі створення нових конструкційних матеріалів і захисних покриттів з підвищеними експлуатаційними властивостями, з пошуку прогнозних параметрів для контролю технічного стану, створення систем автоматизованого контролю. Але натеper повністю перейти на систему ремонту АТ за фактичним технічним станом неможливо, оскільки конструкція багатьох типів ПС і АД, що експлуатуються, не відповідають усьому комплексу необхідних вимог.

У зв'язку з цим практичного поширення набула комбінована система, яка отримала назву ремонту за оптимальними техніко-економічними показниками. За цієї системи об'єкт ремонту поділяють на складові частини. Одну групу складових частин, які не мають резервування і безпосередньо впливають на безпеку польотів, ремонтують за планово-попереджувальною системою або системою регламентних ремонтів, другу – за системою ремонту за фактичним технічним станом, третю – за системою після відмови. Остання система ремонту може застосовуватися тільки для частин, які мають резервування і їх відмова не впливає на безпеку польотів.

Ремонт АТ виконується завжди за розробленою технологією, яка узгоджена з організацією головного конструктора і заводом-виробником. Залежно від досягнутого технічного рівня авіаремон-

тного підприємства, особливостей конструкції АТ, кількості виробів, що одночасно ремонтуються, і обсягу виробничої програми авіаремонтного підприємства використовують різні методи організації ремонту.

Аналіз виробничого процесу ремонту АТ показує, що ремонт може бути організований за такими методами [3]: індивідуальним, бригадним, бригадно-вузловим, потоковим, потоково-стендовим.

Індивідуальний метод характеризується тим, що виконання технологічних процесів доручається окремим виконавцям. За бригадним методом виконання технологічних процесів доручається бригаді виконавців.

Відповідно до бригадно-вузлового методу групі виконавців доручається виконання ремонту окремих вузлів чи агрегатів.

Потоковий метод організації ремонту АТ ґрунтується на використанні поточкових ліній, які забезпечують узгодження у часі виконання всіх операцій технологічного процесу ремонту в заздалегідь установленій послідовності.

Потоково-стендовий метод – це різновид поточкового методу, коли весь комплекс ремонтних робіт поділяється на групи з приблизно однаковою трудомісткістю. Ці групи робіт виконуються на закріплених за ними стендах, на яких встановлюються ПС або АД. Таким чином, кількість однотипних виробів, що одночасно ремонтуються, дорівнює кількості стендів. По закінченні комплексу робіт на одному стенді ПС (АД) переміщується на наступний стенд. Так, послідовно переміщуючись від одного стенда до іншого, виконується весь цикл ремонтних робіт.

Потоково-стендовий метод дозволяє раціонально розподілити ремонтні роботи, забезпечити повне завантаження обладнання, високу культуру праці та організацію робочих місць.

Заслугує на увагу зональний метод організації ремонту, який використовується, наприклад, під час ремонту літаків Ан-24, Ан-26 і Ан-32 на авіаремонтному заводі 410 ЦА [3]. Сутність цього методу полягає у тому, що літак поділяють на зони відповідно до технологічних рознімів і ці зони для ремонту розподіляють між певними виконавцями. Так, літак Ан-24 у відповідності до схеми, показаної на рис. 2.1, розбивається на десять таких зон. Кожна зона являє собою обмежену певними технологічними рознімами частину літака з усім обладнанням, що міститься в його межах.

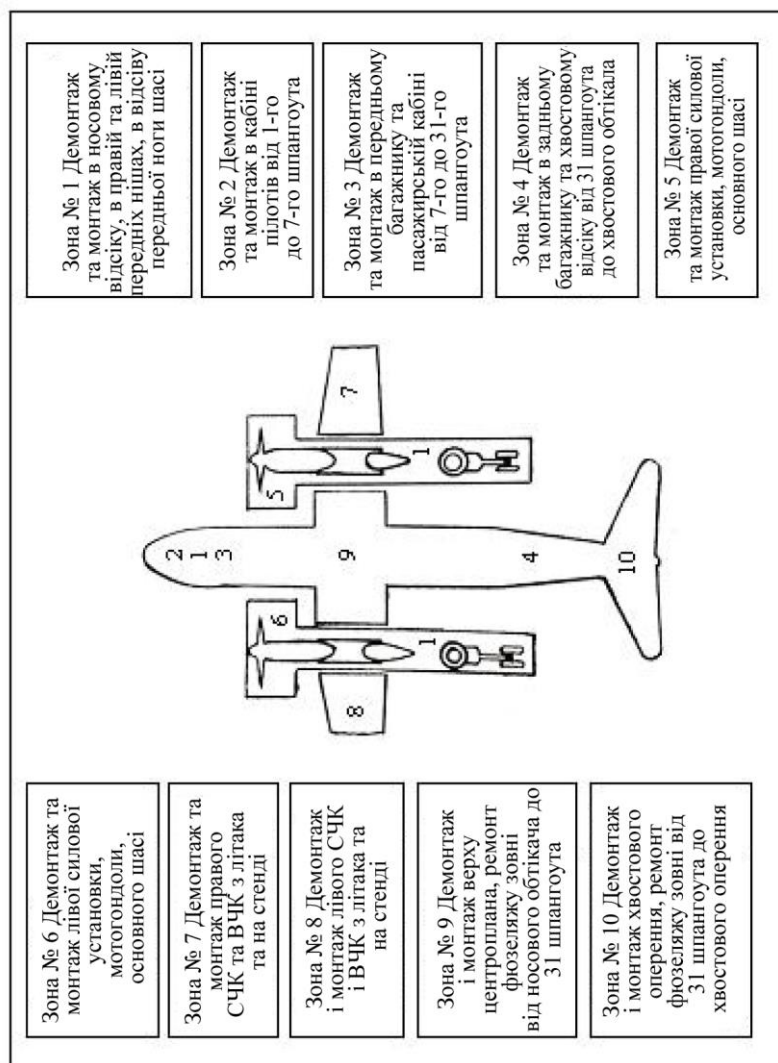


Рис. 2.1. Схема розчленування літака Ан -24 на зони для виконання ремонтних робіт

Для здійснення ремонтних робіт у зоні виділяються виконавці різних спеціальностей та інженерно-технічні працівники, які працюють під керівництвом майстра зони та контрольного майстра. Колектив працівників зони виконує повний обсяг ремонтних робіт у закріпленій за ними зоні, несе персональну відповідальність за весь технологічний процес, якість і термін виконання ремонтних робіт у цій зоні.

У практиці авіаремонтного виробництва застосовують такі способи ремонту:

- ремонт заміною пошкоджених деталей, вузлів і агрегатів новими;
- ремонт деталі без установлення на ній додаткових деталей чи без нанесення додаткового матеріалу (наприклад, ремонт деталей усуненням незначних пошкоджень робочої поверхні поліруванням, притиранням, заварюванням тріщин тощо);
- ремонт деталі з установленням додаткових деталей (наприклад, ремонт за допомогою установлення підсилювальних накладок, уставок тощо);
- ремонт деталі із заміною пошкодженої частини. Пошкоджена частина видаляється, а на її місце встановлюється і прискріплюється нова (наприклад, ремонт заміною ділянки стрингера, обшивки, жарової труби тощо);
- ремонт деталі з нанесенням додаткового матеріалу (наприклад, відновлення форми і розмірів зношених поверхонь наплавленням, металізацією тощо).

Для відновлення посадки деталей у спряженнях застосовують спосіб ремонтних розмірів. У цей спосіб одну із деталей спряження ремонтують механічним обробленням до усунення дефектів, викликаних зносом, а другу деталь замінюють новою або відновленою з розмірами, необхідними для збереження початково заданої посадки.

Вибір та призначення того чи іншого способу ремонту залежить від конструктивно-технологічних особливостей деталі, її матеріалу, методів оброблення, виду і розмірів дефекту, вимог, що

установлені технічними вимогами до ремонту, наявності на підприємстві відповідної виробничо-технологічної бази для виконання ремонту. Перший спосіб дає змогу скоротити простої АТ у ремонті, але значно підвищує собівартість ремонту, оскільки витрати на виготовлення і придбання нових деталей, як правило, більші, ніж витрати на їх відновлення.

У зв'язку з цим одним із головних завдань підвищення економічної ефективності ремонту АТ є розширення номенклатури відновлюваних деталей. Розроблення і проектування відповідних технологічних процесів є одним із завдань технологічної підготовки авіаремонтного виробництва.

2.2. Організаційно-виробнича структура авіаремонтного підприємства. Виробничий і технологічний процеси ремонту

Авіаремонтні підприємства натеper в Україні та країнах СНД через обставини, що історично склалися, є основними базовими підприємствами з ремонту ПС і АД. Робота авіаремонтних підприємств тісно пов'язана з діяльністю всієї системи галузі авіаційно-промислового комплексу, цивільної та військової авіації.

Сучасний авіаремонтний завод – це високоорганізоване підприємство, яке складається із виробничих ланок (цехів, дільниць) основного та допоміжного виробництв і ланок управління (відділів, бюро, секторів).

Організаційно-виробнича структура авіаремонтного підприємства являє собою склад, форми, спеціалізації та взаємозв'язки виробничих ланок, ланок допоміжного виробництва та ланок управління. Основними факторами, які впливають на організаційну структуру авіаремонтного підприємства, є:

- конструктивно-технологічна характеристика АТ, що ремонтується на підприємстві;
- масштаб виробництва;
- ступінь спеціалізації та кооперування підприємства з іншими підприємствами;
- ступінь спеціалізації виробництва всередині підприємства.

Аналіз виробничої діяльності авіаремонтних підприємств показує, що авіаремонтне виробництво є особливим видом виробництва. З одного боку, авіаремонтне підприємство – це промислове підприємство за його організацією, технологією, оснащенням і трудовим процесом. Із другого боку, це підприємство, яке надає послуги в галузі головного технологічного процесу авіатранспортної системи – авіаційних перевезень та забезпечення боєздатності військової авіації. Техніко-економічна ефективність авіаремонтного виробництва сприяє виконанню загального завдання підвищення ефективності використання АТ.

Виробничий процес ремонту АТ складається з основного (технологічного), допоміжного і обслуговуючого процесів. Технологічний процес визначає профіль авіаремонтного підприємства (його спеціалізацію) і складає основний обсяг трудовитрат у виробництві (80...85 %). До основного (технологічного) процесу належать усі ремонтні роботи, які безпосередньо пов'язані зі зміною стану об'єкта ремонту в процесі перетворення ремонтного фонду в готову продукцію (відремонтоване ПС, АД, вузол, агрегат). Допоміжний процес охоплює роботи, пов'язані із виробництвом необхідного для ремонту спеціального інструменту і оснащення, ремонтом обладнання тощо. До обслуговуючого процесу належать роботи, пов'язані з організацією і обслуговуванням робочих місць, одержанням і зберіганням матеріалів, заготовок, запасних частин, перевіркою і контролем матеріалів, приладів, інструменту в лабораторіях, енергопостачанням тощо.

Технологічний процес ремонту незалежно від конструктивно-технологічної характеристики об'єкта ремонту і впровадженій системи ремонту завжди виконується у строгій технологічній послідовності, яка включає такі основні етапи (рис. 2.2): приймання АТ у ремонт, попереднє очищення, розбирання, промивання, очищення деталей, визначення технічного стану (дефектація) деталей, ремонт (відновлення) деталей, виготовлення запасних частин, комплектування деталей на вузлове та агрегатне складання, складання вузлів та агрегатів, їх обкатування та випробування, загальне складання, фарбування, випробування, консервування, передача відремонтованої продукції замовнику або на зберігання.

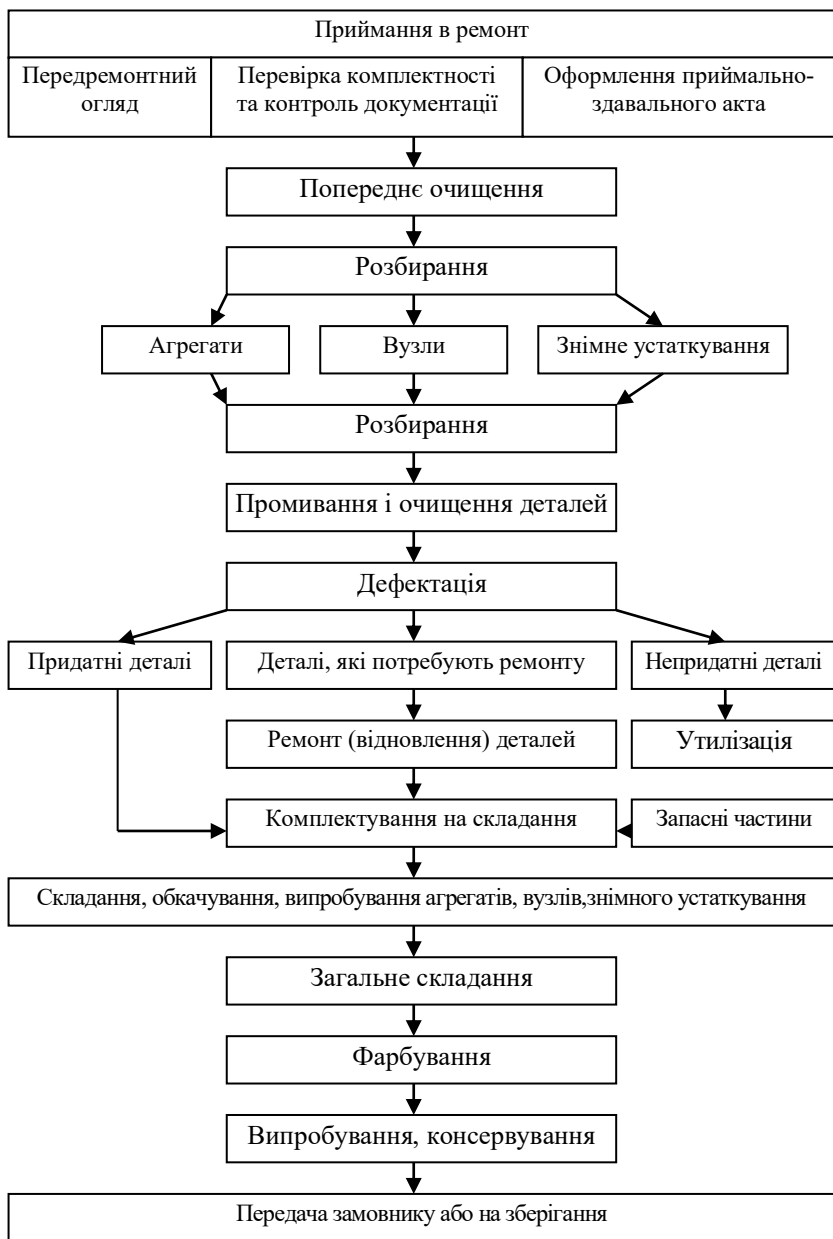


Рис. 2.2. Структурна схема технологічного процесу капітального ремонту АТ

Для забезпечення безперебійності та ритмічності виробництва на авіаремонтному підприємстві необхідна чітка підпорядкованість допоміжних і обслуговуючих виробництв основному (технологічному). Основний ефект від авіаремонтного виробництва може бути отриманий за рахунок удосконалення технологічного процесу, який є основною частиною виробничого процесу. Основними напрямками удосконалення технологічного процесу ремонту АТ можуть бути: підвищення ефективності організації і управління авіаремонтним підприємством; перспективне планування ремонтного фонду; удосконалення методів та способів діагностування і прогнозування технічного стану АТ; упровадження нових ресурсозберігаючих технологій; розширення номенклатури деталей, що відновлюються у процесі ремонту; упровадження засобів механізації та автоматизації технологічних процесів; підвищення рівня науково-технічного забезпечення виробництва.

2.3. Загальні організаційно-технічні заходи щодо підготовки виробництва до ремонту авіаційної техніки

Ефективність авіаремонтного виробництва значною мірою залежить від рівня і організаційно-технічної досконалості підготовки його виробничих процесів до ремонту.

Процес підготовки і виконання ремонту на першому екземплярі об'єкта ремонту АТ називають *освоєнням ремонту*.

Процес ремонту наступних декількох екземплярів до початку серійного ремонту конкретного типу АТ називають *дослідним ремонтом*.

Кількість екземплярів для дослідного ремонту може бути різною. Так, для літаків дальніх магістральних ліній вона може становити 2 – 4 екземпляри, для інших ПС кількість дослідних екземплярів може бути більшою.

Процес ремонту після підготовки, освоєння і дослідного ремонту називають *серійним ремонтом*.

Період від початку підготовки до освоєння ремонту об'єкта АТ можна умовно поділити на три етапи [4]:

- підготовка до освоєння і дослідного ремонту;
- освоєння і дослідний ремонт;
- серійний ремонт і вдосконалення серійного ремонту.

У період підготовки до освоєння і дослідного ремонту нового типу АТ на авіаремонтному підприємстві розробляється комплексний план з підготовки до ремонту і здійснюються необхідні загальні організаційно-технічні заходи щодо його реалізації: проводяться наради керівного складу, технічної ради підприємства, відділів і цехів з підготовки і освоєння ремонту; вивчається досвід технічної експлуатації об'єкта ремонту; складаються графіки і програми робіт з підготовки, освоєння, дослідного і серійного ремонту; складаються кошториси витрат на ремонт; готуються заявки на отримання технічної документації; розробляються план і програми підготовки кадрів, проводиться їх укомплектування; переглядаються і удосконалюються організація виробництва і структура підприємства; за необхідності проводиться реконструкція діючих і будівництво нових виробничих та інших площ і приміщень, освоюються нові технологічні процеси ремонту; здійснюється матеріально-технічне забезпечення виробництва; розробляється технічна документація на ремонт.

Технічна документація, яка призначена для освоєння ремонту ПС, включає: обліковані серійні креслення, технічні умови та інструкції; технічні описи об'єктів ремонту; теоретичні креслення об'єктів ремонту, ілюстративні плакати, розрахунки на міцність конструктивних елементів, карти спецконтролю деталей; технології складання, регулювання, доведення і випробовування агрегатів, систем і ПС в цілому; альбоми формулярних та фідерних схем; креслення обладнання, оснастки і спеціальних інструментів; матеріали з випробування першого екземпляра, головної і лідерної групи, що включають статичні та ресурсні випробування систем, агрегатів і в цілому ПС; висновки про ремонтпридатність та допустиму кількість ремонтів ПС, керівництво з ремонту; альбом основних з'єднань, ремонтних допусків і переліки замінників матеріалів деталей; технічні умови – відомості на дефектацію-відбракування деталей і ремонт; каталоги деталей, складальних одиниць і комплектуючих виробів; відомості ремонтних запасних частин і інструментів; норми витрати запасних частин і матеріалів на ремонт; норми витрати часу на складальні, регулювальні, довідні і випробувальні роботи; програми наземних і льотних випробувань ПС після ремонту; інструкції і регламенти технічного обслуговування ПС; настановлення з льотної експлуатації ПС.

Крім технічної документації, у період підготовки до ремонту повинні бути замовлені й отримані від конструкторського бюро і заводу-виробника макети, розрізи, планшети, стенди для наочного вивчення конструкції ПС (АД), побудови і принципу роботи їх систем, вузлів та агрегатів.

Підготовка кадрів для виконання ремонту передбачає навчання і виробниче стажування керівного складу, інженерно-технічних працівників і працівників підприємства з вивчення конструкції, технологічних процесів ремонту і випробування об'єкта ремонту. Вивчення конструкції і технологічного процесу ремонту ПС починається з вивчення його льотно-технічних і техніко-економічних характеристик, конструкції планера, АД, окремих систем, вузлів і агрегатів. Після цього зі складу інженерно-технічних працівників і робітників виділяються окремі спеціалісти з виконання ремонту на конкретних системах, конструктивних елементах, вузлах і обладнанні, які додатково вивчають конструкцію, принцип дії, особливості проектування, виготовлення, експлуатації і ремонту доручених їм об'єктів. До закінчення освоєння ремонту всі працівники-виконавці повинні скласти іспити і отримати відповідні свідоцтва, а майстри виробничих ділянок та відділу технічного контролю пройти атестацію на право приймання робіт.

Переогляд організації виробництва і структури підприємства передбачає розроблення планів виробничих цехів, дільниць, стендів, стоянок, складів ремфонду та інших виробничих площ з урахуванням поточностендового або іншого методу організації ремонту, а в разі потреби будівництво нових і реконструкцію діючих виробничих та інших приміщень; організацію і реорганізацію відділів, цехів і виробничих дільниць, а також іншу реорганізацію структури виробництва, пов'язану зі зміною об'єкта ремонту, обсягу програми ремонту тощо.

Освоєння нових технологічних процесів ремонту здійснюється за відсутності на підприємстві технологій, передбачених керівництвом з ремонту об'єкта АТ, ремонт якого освоюється, а також у разі потреби впровадження більш прогресивних технологічних процесів ремонту, спрямованих на підвищення якості відремонтованої АТ, забезпечення зниження собівартості ремонту, екологічної безпеки, умов охорони праці, розширення номенклатури відновлюваних деталей тощо.

Матеріально-технічне забезпечення виробництва включає підготовку заявок на постачання і одержання необхідного стандартного та нестандартного обладнання, оснастки, контрольно-вимірювальної апаратури та інструментів, ремонтно-монтажного інструменту, запасних частин, вузлів і агрегатів, матеріалів для ремонту першого екземпляра АТ. Крім цього визначається можливість уніфікації та модернізації обладнання, оснастки, апаратури, інструменту, що є на підприємстві для їх використання для освоєння ремонту визначеного об'єкта АТ; розробляються технічні умови, креслення і розміщуються замовлення на інших підприємствах для виготовлення універсального типового і спеціального обладнання, оснастки, апаратури, стендів, інструментів. Виготовлене і отримане обладнання вводиться в експлуатацію у міру його надходження згідно з розробленим планом переоснащення підприємства.

Розроблення технічної документації на ремонт полягає в підготовці комплексу документів, необхідних і достатніх для виконання ремонту виробу АТ або його складових частин. Так, для освоєння ремонту ПС технічна документація розробляється за двома паралельними напрямками:

- для всіх етапів технологічного процесу ремонту знімних виробів ПС;
- для всіх етапів технологічного процесу ремонту планера та складання, регулювання, доведення і випробування ПС у цілому.

Для виконання цих робіт розробляють:

- плани і графіки освоєння ремонту знімних агрегатів, обладнання, конструктивних елементів і планера першого екземпляра ПС;
- оперативні графіки розроблення досвідної технології ремонту на зазначені об'єкти АТ;
- виробничо-контрольну документацію на всі етапи технологічного процесу ремонту і переліку операцій, що підлягають пред'явленню для контролю відділом технічного контролю;
- карти дефектації, умови на відбракування та ремонт деталей, відомості комплектації, протоколи випробувань агрегатів, систем і післяремонтного випробування ПС в цілому;
- формуляр силових елементів планера ПС для ремонту;

- перелік деталей, що підлягають постійній заміні на першому екземплярі і під час дослідного ремонту;
- перелік нових виробів і матеріалів, що підлягають вхідному контролю;
- заходи з метрологічного забезпечення виробництва, забезпечення вимог охорони праці і екологічної безпеки.

Уточнюють також можливості застосування технологічних процесів ремонту, які використовувалися на аналогічних виробках, що раніше ремонтувались на підприємстві, або ремонтуються на інших підприємствах.

Технологія ремонту та інші види технічної документації розробляються на основі отриманої від розробника і заводу-виробника технічної документації, попереднього досвіду ремонту прототипів (аналогів) АТ об'єкта ремонту, що освоюється, аналізу досягнень науки і техніки, результатів спеціально виконаних для цього науково-дослідних робіт, передового досвіду організації і технології виконання ремонту.

Під час розроблення технічної документації на ремонт особлива увага приділяється розробленню технічних умов на визначення технічного стану (дефектації) і ремонт об'єктів АТ, оскільки від точності і обґрунтованості призначення допустимих і недопустимих величин робочих параметрів і характеристик деталей, вузлів, систем, агрегатів і в цілому виробу АТ залежать якість і економічна ефективність ремонту, надійність відремонтованої АТ і безпека її експлуатації.

Після отримання першого екземпляра виробу АТ та виконання необхідних заходів з підготовки виробництва до ремонту проводиться освоєння ремонту. У процесі освоєння уточнюються дослідні технології та інша технічна ремонтна документація, визначаються та уточнюються норми витрат часу і розряди на виконання ремонтних робіт, норми витрат запасних частин і матеріалів, собівартість ремонту. Перший відремонтований екземпляр виробу пред'являється міжвідомчій комісії для отримання дозволу на дослідний ремонт. Одночасно комісія визначає готовність підприємства до організації серійного ремонту.

За результатами освоєння і дослідного ремонту розробляються і узгоджуються з конструкторським бюро та заводами-

виробниками проекти специфікацій комплектів запасних частин і зведені переліки технічної документації для серійного ремонту; розробляються і затверджуються технічні умови на ремонт, директивна технологія, комплектується та затверджується «справа ремонту». Крім цього, узгоджується з конструкторськими бюро і заводами-виробниками комплект ремонтної технологічної документації; розробляються і затверджуються порядок оформлення формулярів, паспортів об'єктів АТ, введення в дію системи обліку і контролю конструктивно-технологічних доробок, базових переліків врахованих відмов, несправностей і дефектів, системи збирання, обліку оброблення і аналізу інформації про надійність ПС, АД, їх систем і агрегатів; визначається і узгоджується з конструкторським бюро і заводами-виробниками обсяг робіт під час виконання всього технологічного процесу ремонту.

У процесі серійного ремонту на основі отриманого досвіду ремонтів, останніх досягнень науки і техніки, змін в організації і управлінні виробництвом проводиться подальше уточнення технічної документації, удосконалення технологічних процесів ремонту і структури виробництва, переглядаються перелік і послідовність виконання ремонтних робіт, уточнюються технічні умови на ремонт. З метою підвищення технічно-економічної ефективності і якості ремонту проводяться роботи із впровадження нових більш ефективних технологічних процесів, спрямованих на розширення номенклатури відновлюваних деталей, скорочення витрат матеріалів, ресурсозбереження та енергозбереження; удосконалюється діюче і освоюється нове високопродуктивне обладнання; упроваджуються засоби механізації та автоматизації виробничих процесів; налагоджується система постачання запасних частин, у тому числі власна система підприємства часткового виготовлення і забезпечення ремонту запасними частинами; ведуться роботи з підвищення надійності АТ після ремонту, збільшення міжремонтних ресурсів, скорочення тривалості ремонту. Виконання зазначених заходів у процесі вдосконалення ремонту дозволяє підвищити техніко-економічну ефективність і якість серійного ремонту АТ, а отже, надійність, безпеку експлуатації і ефективність використання АТ.

2.4. Функції і завдання технологічної підготовки авіаремонтного виробництва

Технологічну підготовку авіаремонтного виробництва проводять у таких випадках:

- освоєння ремонту нового типу або нової модифікації АТ;
- освоєння нових або вдосконалення діючих технологічних процесів ремонту;
- збільшення програми ремонту;
- підвищення технологічного і організаційного рівнів виробництва, наприклад, у разі зміни методу організації ремонту.

Найбільший обсяг робіт з технологічної підготовки припадає на період освоєння ремонту нового типу АТ. Основні завдання технологічної підготовки до ремонту нового типу АТ полягають у забезпеченні:

- освоєння ремонту і виконання підприємством програми ремонту;
- високої якості ремонту, що означає повне або часткове відновлення всіх передбачених нормативно-технічною документацією властивостей та характеристик об'єкта ремонту і високої його післяремонтної надійності та довговічності;
- високої економічної ефективності ремонту, що включає скорочення трудомісткості ремонтних робіт, витрат на матеріали, запасні частини, енергетичні ресурси, скорочення тривалості ремонту і т.ін;
- виконання норм охорони праці та екологічної безпеки виробництва.

Характер і зміст робіт з технологічної підготовки авіаремонтного виробництва залежать від численних факторів: складності конструкції об'єкта ремонту, виробничої програми ремонту, виробничої структури авіаремонтного підприємства, наявності на підприємстві необхідної технологічної бази, призначення технологічної підготовки та багатьох інших. Разом з цим незалежно від зазначених факторів технологічна підготовка виробництва для

освоєння і вдосконалення ремонту АТ охоплює такі види робіт: розроблення технічних умов на ремонт; вибір і розроблення способів ремонту; проектування технологічних процесів ремонту для окремих складових частин і ПС або АД у цілому; проектування і виготовлення технологічного обладнання, оснастки і спеціального інструменту.

Одне із головних завдань, що вирішується під час проектування технологічного процесу ремонту АТ, полягає у виборі найбільш ефективних, науково обґрунтованих способів і технологій ремонту, визначенні оптимальних методів організації технологічного процесу ремонту і методів організації праці.

Особливістю авіаремонтного виробництва є значна складність і велика номенклатура об'єктів ремонту, зокрема деталей, що підлягають відновленню. Причому, як показує практика ремонту АТ, кількість таких деталей постійно зростає зі збільшенням напруження. Тому вагома роль у загальній технологічній підготовці авіаремонтного виробництва як на етапі освоєння ремонту, так і на етапі серійного ремонту відводиться технологічній підготовці з відновлення деталей.

Система технологічної підготовки виробництва з відновлення деталей на авіаремонтних підприємствах, як і на ремонтних підприємствах загального машинобудування [5; 6], повинна забезпечити розроблення технологічних процесів відновлення деталей встановленої номенклатури, нормативно-технічної документації на відповідні технологічні процеси, проектування і виготовлення засобів технологічного забезпечення виробництва, формування пропозицій заводам-виробникам з удосконалення технологічно-конструктивних показників деталей з метою підвищення їх ремонтної придатності.

Основним конструктивним документом, що розробляється в системі технологічної підготовки виробництва з відновлення деталей є ремонтне креслення. Ремонтні креслення розробляються на деталі кожного найменування, які підлягають відновленню під час ремонту певного типу АТ, на основі технічних вимог на ре-

монт, робочих креслень заводу-виробника на виготовлення деталі, результатів експериментальних і експлуатаційних випробувань з визначення рівня надійності відремонтованих деталей. По кожній конкретній деталі ремонтне креслення має відображати показники, що визначають якість її відновлення: геометричні параметри, параметри шорсткості поверхні, фізико-механічні параметри поверхневого шару та інші показники, установлені для конкретної деталі відповідними технічними вимогами і нормативно-технічною документацією. На ремонтному кресленні вказуються також місця дефектів на деталі; надається інформація про характер дефекту (тріщини, корозія, знос тощо), допустиму контролювану величину параметра дефекту, основний та допоміжні способи усунення дефекту; наводяться схеми базування деталі під час виконання операцій з відновлення та механічного оброблення.

2.5. Забезпечення технологічності конструкції об'єктів ремонту

Однією із функцій ТПВ є забезпечення технологічності конструкції виробу, яка передбачає взаємопов'язане вирішення конструкторських і технологічних завдань, спрямованих на підвищення продуктивності праці, досягнення оптимальних трудових і матеріальних витрат та скорочення часу на виробництво, технічне обслуговування і ремонт виробу.

Технологічність конструкції – це сукупність властивостей конструкції виробу, що забезпечують оптимальні витрати праці, засобів, матеріалів і часу за встановленими показниками якості та встановленими умовами виготовлення, експлуатації та ремонту. До умов виготовлення і ремонту виробу належать тип виробу, спеціалізація виробництв, обсяг випуску і повторність випуску продукції, технологічні процеси, що використовуються у процесі виробництва чи ремонту виробу.

Залежно від ознак, що характеризують прояв технологічності конструкції виробу, розрізняють виробничу технологічність і експлуатаційну технологічність.

Виробнича технологічність конструкції виробу проявляється у скороченні коштів та часу на конструкторську і технологічну

підготовку виробництва та процесів виготовлення виробу, включаючи процеси контролю і випробування на виробництві.

Експлуатаційна технологічність конструкції проявляється у скороченні витрат часу і коштів на технічне обслуговування і ремонт виробу.

Технологічність конструкції визначається такими основними факторами, як вид виробу, обсяг випуску, тип виробництва.

Вид виробу визначає головні конструктивні та технологічні ознаки, що обумовлюють основні вимоги до технологічності конструкції. Обсяг випуску і тип виробництва визначають ступінь технологічного оснащення, механізації і автоматизації технологічних процесів, а також спеціалізацію всього виробництва.

Оцінка технологічності виробу може бути якісною і кількісною. Якісна оцінка технологічності здійснюється на основі досвіду виконавця і проводиться на всіх стадіях проектування виробу, коли необхідно вибрати оптимальний варіант конструктивного рішення і не потребується визначення ступеня відмінності технологічності порівнюваних варіантів.

Для кількісної оцінки технологічності встановлюють номенклатуру і значення показників технологічності, які характеризують ступінь задоволення вимог до технологічності конструкції виробу. Номенклатуру показників технологічності конструкції вибирають залежно від виду виробу, типу виробництва і стадії розроблення конструкторської документації. Комплекс показників технологічності включає: базові показники технологічності конструкції виробів із групи виробів, які мають загальні конструктивні ознаки; показники технологічності конструкції, які досягаються під час розроблення виробу; показники рівня технологічності конструкції розроблюваного виробу.

Оптимальні значення базових показників технологічності конструкції виробу вказуються у технологічному завданні на розроблення виробу. Види технологічності конструкції, основні фактори, які визначають вимоги до технологічності конструкції, і види оцінювання технологічності конструкції показано на рис. 2.3.

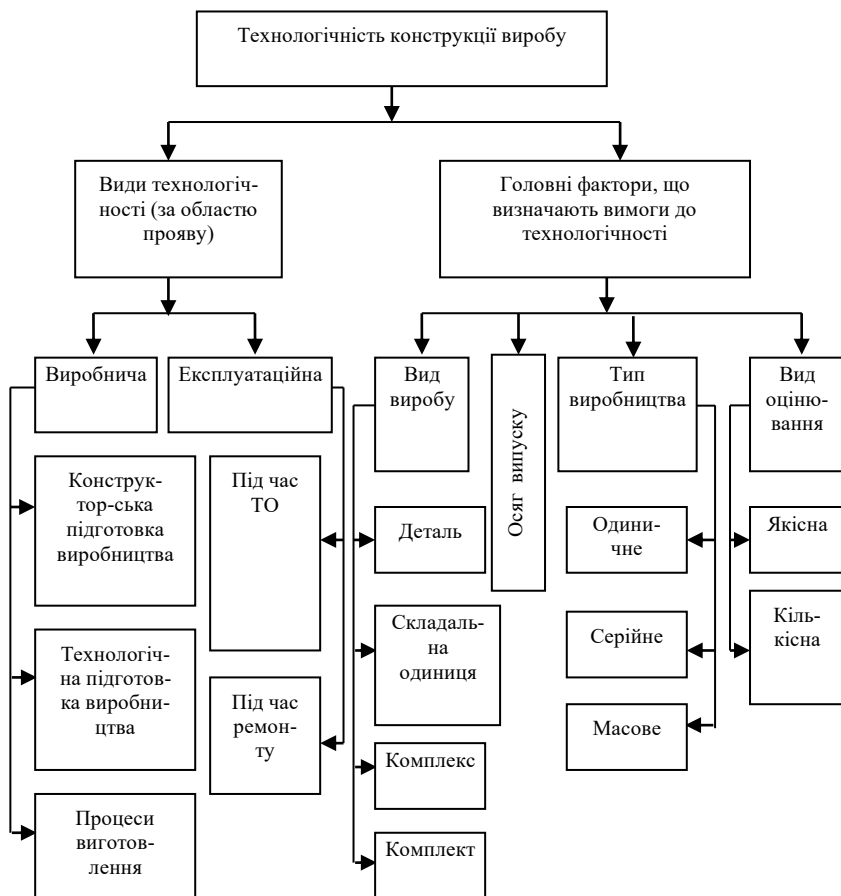


Рис. 2.3. Види технологічності та основні фактори, що визначають вимоги до технологічності конструкції виробу

Класифікацію показників технологічності конструкції виробу зображено на рис. 2.4.

Стандартами ЄСТПВ визначаються також правила і порядок забезпечення технологічності конструкції складальних одиниць і технологічності конструкції деталей. Складальні одиниці та деталі відпрацьовуються на технологічність, виходячи з умови, що їх конструкція повинна задовольняти вимоги виготовлення, експлуатації та ремонту найбільш продуктивними і економічними способами за заданих умов виробництва.

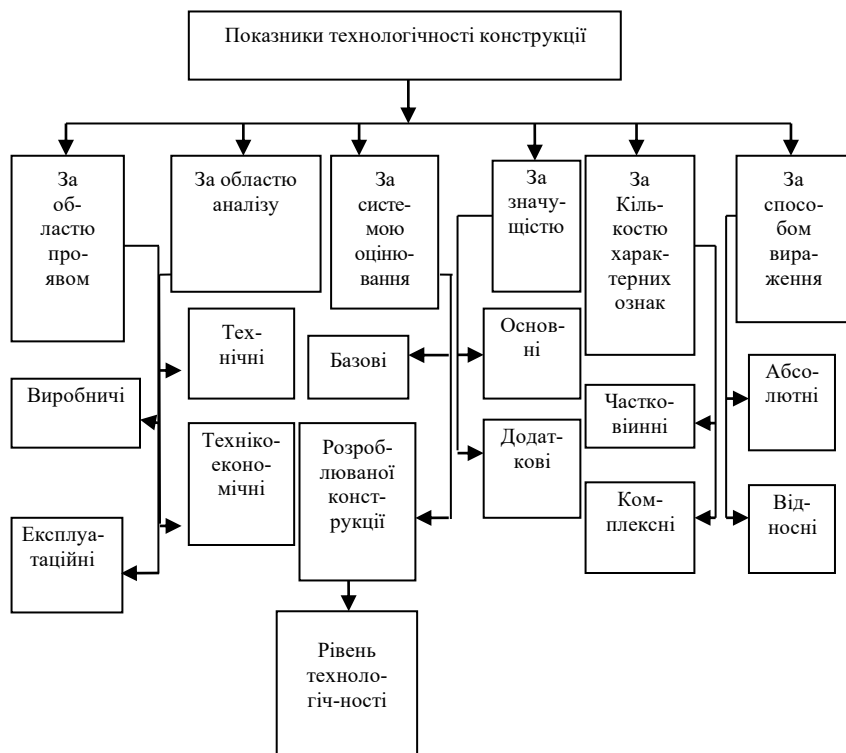


Рис. 2.4. Класифікація показників технологічності конструкції виробу

Конструкція складальної одиниці відпрацьовується на технологічність з урахуванням взаємозамінності, виробничої та експлуатаційної технологічності складових частин складальної одиниці та виробу, у який ця складальна одиниця входить як складова частина.

Експлуатаційну технологічність можна поділити на технологічність конструкції під час технічного обслуговування (ТО) і ремонтну технологічність.

Технологічність під час ТО передбачає придатність конструкції для виконання в умовах заданої системи ТО і ремонту всіх передбачених регламентом форм ТО з досягненням оптимальних значень усіх видів витрат на ТО.

Під ремонтною технологічністю розуміють придатність виробу та його складових частин для проведення ремонтних робіт з метою відновлення його працездатності та продовження ресурсу за мінімальних матеріальних витрат і витрат часу на ремонт.

Технологічність під час ТО і ремонтна технологічність визначаються сукупністю таких властивостей конструкції виробу, як контролепридатність, легкознімність, взаємозамінність, доступність, придатність до відновлення і придатність до регулювання. Кожен із зазначених конструктивних факторів визначає певні вимоги до конструкції виробу і впливає на можливість та технічно-економічні показники виконання робіт з ТО і ремонту.

Контролепридатність означає, що всі частини виробу можуть бути діагностовані для виявлення їх технічного стану. Для цього мають бути забезпечені можливості зручних підходів до об'єктів контролю. Значну роль при цьому відіграє можливість уведення у конструкцію вмонтованих систем автоматизованого контролю, які дають змогу здійснювати моніторинг зміни технічного стану об'єкта контролю за зміною деякого прогностичного параметра, наприклад, температури, рівня вібрації тощо.

Легкознімність частин дозволяє їх замінювати без загального демонтажу виробу, а взаємозамінність забезпечує їх заміну без підбирання і припасування.

Вимога до доступності щодо ремонтної технологічності передбачає:

- раціональне компонування виробу, яке уможливорює зручний доступ для виконання ремонтних робіт;
- забезпечення можливості виконання ремонту окремих складових частин виробу без демонтажу інших його складових частин;
- можливість одночасного виконання максимальної кількості операцій, зокрема демонтажно-монтажних.

Вимога до придатності до відновлення зумовлена з придатністю складових частин виробу до відновлення їх працездатності відповідними технологічними методами. Ця вимога, наприклад, для деталей, що зношуються, забезпечується:

- використанням матеріалу деталі і конструкцією деталі, які дозволяють відновити її до номінальних або ремонтних розмірів;
- використанням для деталей, що швидко зношуються, спеціальних методів поверхневого оброблення, захисних зносостійких покриттів та змінних легкознімних частин;
- можливістю переустановлення деталей з одностороннім зношуванням для роботи симетричною частиною;
- застосуванням прогресивних технологічних процесів відновлення деталей, що уможливають їх багаторазове відновлення.

Придатність до регулювання передбачає наявність достатнього запасу і простоту регулювання параметрів складальних одиниць.

Ураховуючи специфіку технологічного процесу ремонту, вигоди до ремонтної технологічності ПС і АД доцільно поділити на такі групи:

1. Група операцій з розбирання, очищення і промивання. Для цієї групи операцій найбільш важливими показниками ремонтної технологічності є : складність конструкції; доступність до місць розбирання; кількість з'єднань, що підлягає розбиранню; зручність виконання робіт з розбирання; легкознімність; можливість застосування засобів механізації робіт з розбирання, а також засобів і методів високопродуктивного очищення та промивання.

2. Група операцій з визначення технічного стану деталей, вузлів агрегатів та комплектуючих виробів. Найважливіші показники ремонтної технологічності для цієї групи операцій: доступність місць контролю вузлів і деталей для візуального огляду; доступність для проведення контролю параметрів складальних одиниць (зазорів у спряженнях, люфтів, прилягання деталей тощо); можливість виявлення дефектів на деталях неруйнівними методами контролю; контроль технічного стану вузлів та агрегатів без застосування складних спеціальних стендів.

3. Група операцій з відновлення працездатності деталей, вузлів та складальних одиниць. Найбільш значущі показники ремонтної технологічності: придатність деталей, вузлів і складальних одиниць до відновлення з параметрами, що забезпечують їх ресурс не

менший, ніж до наступного ремонту; взаємозамінність деталей та вузлів, що підлягають ремонту; зменшення кількості об'єктів, що підлягають відновленню за рахунок застосування відповідних конструктивно-технологічних заходів, спрямованих на запобігання виникненню експлуатаційних пошкоджень.

4. Група операцій вузлового, загального складання та післяремонтного випробування. Для цієї групи операцій ремонтна технологічність забезпечується такими показниками, як доступність та зручність для виконання робіт із вузлового та загального складання; придатність до регулювання складальних одиниць; складальна контролепридатність та придатність для післяремонтних випробувань.

Конструкції ПС і АД на технологічність опрацьовуються на всіх етапах проектування, ТПВ і виробництва (ремонту) виробу. У процесі опрацювання технологічності в конструкторську документацію вносяться відповідні зміни, які забезпечують досягнення оптимальних показників технологічності виробу. Так приклад, на рис. 2.5 показано схему напрямів підвищення виробничої технологічності ПС [7]. Аналіз технічного ефекту від цих напрямів показує, що їх реалізація в багатьох випадках одночасно буде сприяти підвищенню ремонтної технологічності ПС.

Одним з конструктивних рішень, які забезпечують високу ремонтну технологічність АД, можна вважати їх конструювання за модульним принципом. Модульність конструкції відображає раціональне розчленування АД на окремі модулі, які можна окремо виготовляти, обслуговувати і ремонтувати. Раціональний рівень блоковості дозволяє скоротити витрати праці та часу на виконання демонтажно-монтажних робіт, спростити виконання операцій контролю технічного стану і виявлення несправностей, запровадити агрегатно-вузловий метод ремонту. Однією із головних умов досягнення раціонального рівня блоковості конструкції є умова рівномірності (рівноресурсності). Складові елементи модуля необхідно підбирати так, щоб їх ресурс був не меншим, ніж міжремонтний ресурс усього модуля або кратний цьому ресурсу.

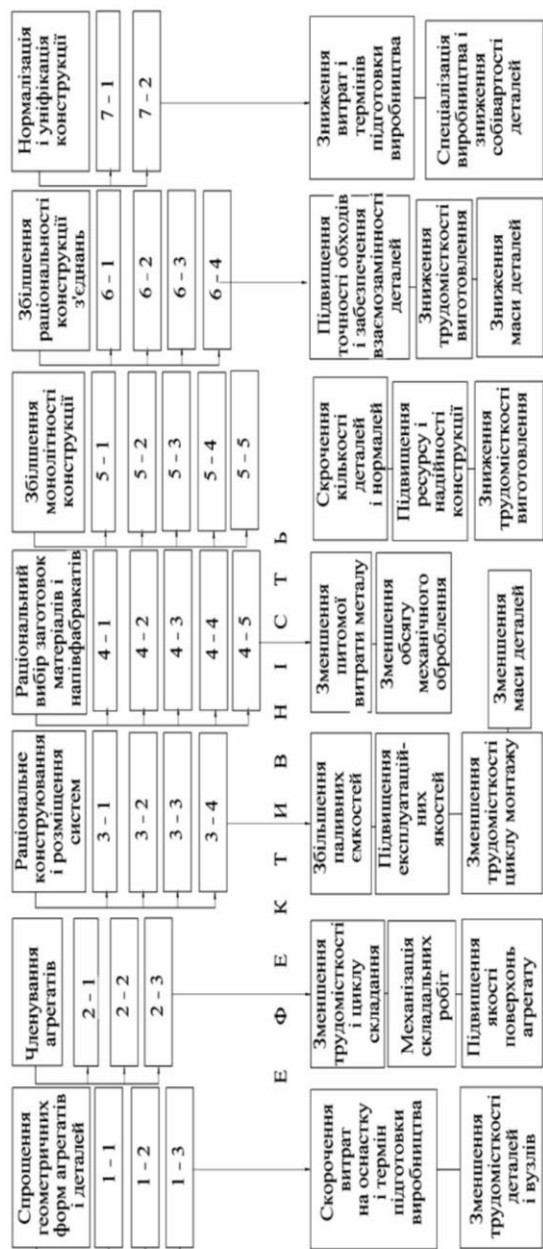


Рис. 2.5. Напрямки підвищення технологічності конструкцій ПС: 1 – 1 спрощення поверхні під обертання; 1 – 2 використання прямолинійних твірих; 1 – 3 використання набору каркаса з відкритими малками; 2 – 1 узгодження стиків елементів каркаса з стилями обшивки; 2 – 2 забезпечення складання поверхні планера в панелях; 2 – 3 конструювання елементів каркаса з урахуванням монтажу систем; 3 – 1 рознім комунікації по стиках агрегатів, відсіків, панелей; 3 – 2 монтаж обладнання у спеціальних відсіках і на панелях; 3 – 3 груповий монтаж обладнання на знімних панелях; 3 – 4 заміна паливних баків герметичними відсіками; 4 – 4 застосування відливки; 4 – 2 застосування гарячих штамповок; 4 – 3 застосування пресованих і трубчастих заготовок; 4 – 4 застосування листів та профілей змінного перерізу; 4 – 5 застосування легкооброблюваних металів; 5 – 1 застосування стільникових конструкцій; 5 – 2 застосування монолітно-складальних конструкцій; 5 – 3 застосування великогабаритних штамповок і відливки; 5 – 4 застосування пресованих заготовок складних форм; 5 – 5 застосування великогабаритних деталей із листів і профілей; 6 – 1 застосування площинних з'єднань; 6 – 2 застосування конструктивних компенсаторів; 6 – 3 застосування точкового, роликowego електрозварювання замість болтів і заклепок; 6 – 4 застосування автоматичного клепання каркасних вузлів; 7 – 1 підвищення спадковості і повторюваності нормалей, деталей і агрегатів; 7 – 2 скорочення асортименту матеріалів, напівфабрикатів і нормалей

2.6. Порядок розроблення технологічного процесу ремонту авіаційної техніки

Розроблення (проектування) технологічного процесу ремонту АТ включає три стадії [4]: початкову, проміжну і остаточну.

На першій, початковій стадії розробляються керівні і технологічна документація, складається план-графік підготовки виробництва до виконання ремонту і випуску із ремонту першого екземпляра АТ. На другій стадії розробляються тимчасова технологія і оснащення, освоюється технологічний процес ремонту. На третій стадії розробляється серійна технологія і забезпечується оснащення виробництва для здійснення серійного ремонту.

Основним документом, що розробляється на технологічний процес ремонту АТ, є поопераційна технологія.

Поопераційна технологія передбачає раціональне розчленування технологічного процесу на етапи, фази та операції і визначає послідовність їх виконання, а також необхідне обладнання, пристосування та інструменти, технологічні режими оброблення, способи і режими випробувань, кваліфікацію та розряди виконавців, норми витрат матеріалів і часу на виконання робіт. До поопераційної технології додаються також технологічні інструкції з виконання окремих операцій і типових робіт, технологічні відомості з переліком обов'язкових для комплектування агрегатів, вузлів, деталей, перелік об'єктів, що підлягають дефектації і контролю, інші технологічні вказівки. Склад і зміст технологічної документації, що розробляються на авіаремонтному підприємстві для освоєння і виконання ремонту АТ, залежать від конструктивно-технологічної характеристики об'єкта ремонту, масштабів і програми ремонту, характеристики авіаремонтного підприємства, ступеня його спеціалізації і кооперування, упровадженої системи і методів ремонту. Приблизну схему розроблення серійної поопераційної технології ремонту АТ показано на рис. 2.6.

Вихідними даними для проектування технологічного процесу ремонту АТ є:

- технічний опис, формуляри, паспорти, комплекти креслень, вузлові і детальні специфікації на ПС, АД, їх агрегати та комплектуючі вироби;
- дані про надійність, призначені ресурси і строки служби;
- бюлетені з доопрацювань конструкцій, вузлів, агрегатів, деталей;

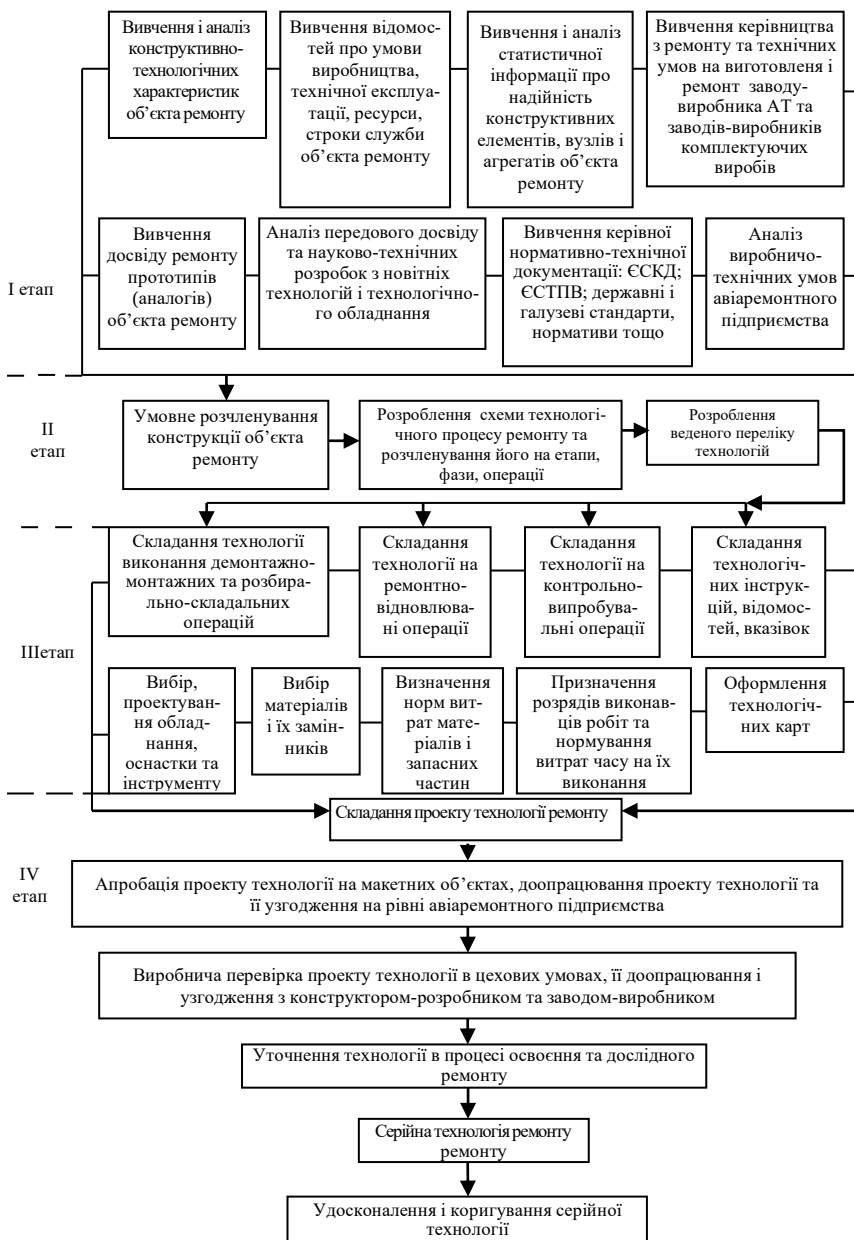


Рис. 2.6. Схема розроблення технології ремонту АТ

- керівництво з ремонту заводу-виробника;
- технічні умови на капітальний ремонт виробу АТ і ремонт (відновлення) його складових частин;
- специфікації обладнання, спецоснастки та інструменту, що рекомендуються розробником і заводом-виробником для ремонту;
- опис, виробничі інструкції з типових технологічних процесів заводу-виробника;
- результати аналізу досвіду ремонту прототипу та передового досвіду в галузі технології і організації ремонту машин;
- інформаційні бюлетені, патенти, публікації про нові прогресивні технології, засоби технічного оснащення та методи ремонту;
- вимоги ЄСКД, ЄСТПВ, державних, галузевих стандартів і стандартів підприємства;
- матеріали з визначення режимів технологічних процесів, норм витрат матеріалів, часу тощо;
- виробнича програма ремонту;
- планові показники собівартості, трудомісткості і тривалості ремонту;
- дані про наявне на підприємстві обладнання, оснастку, інструменти і їх прийнятність для виробу АТ, ремонт якого буде виконуватись;
- дані про наявні на підприємстві виробничі площі та їх планування.

Важливою умовою розроблення технологічних процесів ремонту АТ є дотримання технічних умов на ремонт.

Технічні умови на ремонт – це комплекс технічних вимог і документів до показників, параметрів і характеристик, які повинні задовольняти вироби після ремонту. Загальні технічні умови на ремонт ПС і АД включають технічні умови на їх агрегати, вузли і деталі, а також технічні умови на виконання демонтажно-монтажних і розбирально-складальних операцій, промивання і очищення, дефектацію, ремонт (відновлення), регулювання і післяремонтні випробування. Усі встановлені нормативно-технічною документацією властивості виробу під час виконання ремонту повинні бути в основному збережені і відповідати новому виробу. Відхилення їх від значень, установлених для нового виробу, яке може допускатись в незначних межах, має бути

обґрунтованим необхідними розрахунками, результатами експериментальних досліджень, стендових і експлуатаційних випробувань.

2.7. Вибір принципу організації виконання і схеми технологічного процесу ремонту

Для виконання ремонту деталі та вузли, на які розбираються ПС і АД, об'єднуються в комплекти і групи.

У комплекти об'єднують конструктивно подібні та взаємопов'язані в конструкції ПС і АД деталі, вузли і агрегати. Вони характеризуються спільністю технологічних завдань і допускають виконання основного обсягу ремонту комплекту на спеціалізованих дільницях і цехах. Комплекти, у свою чергу, розбивають на групи, які комплектують з урахуванням конструктивної подібності деталей, вузлів і агрегатів, ремонт яких може виконуватись з використанням однотипного технологічного обладнання. Спільність технологічного обладнання створює умови для ремонту об'єктів кожної із груп за типовими технологічними процесами, а також забезпечує більш сприятливі умови для впровадження потокових методів ремонту і застосування засобів механізації робіт.

З урахуванням визначених ознак у комплект, наприклад під час ремонту літаків, доцільно об'єднувати:

- знімні агрегати планера (крила, оперення), основний обсяг ремонту яких пов'язаний з клепальними роботами;
- агрегати систем літака, основний обсяг ремонту яких пов'язаний з точними слюсарно-доводжувальними операціями і випробуванням агрегатів на спеціальних стендах;
- деталі і вузли шасі, ремонт яких в основному пов'язаний з слюсарно-механічними, гальвановідновлюваними і складальними процесами;
- капоти, зализи, обтікачі, обшивки і панелі, ремонт яких зводиться здебільшого до рихтувальних і частково до клепальних робіт;
- металеві баки та іншого типу ємкості, ремонт яких зводиться передусім до рехтувальних і клепально-зварювальних робіт;
- мастильні радіатори і трубопроводи, ремонт яких в основному виконується паянням.

В окремі комплекти можна об'єднувати також деталі та вузли керування, елементи кріплення силових установок, повітряні

гвинти, радіо-, електро- і приладне обладнання літака, металеві і пластмасові деталі внутрішнього обладнання, теплозвукова ізоляція, м'які резинові баки, резинотехнічні вироби і остеклення. Наближений склад комплектів для турбогвинтового транспортного літака показано на рис. 2.7.

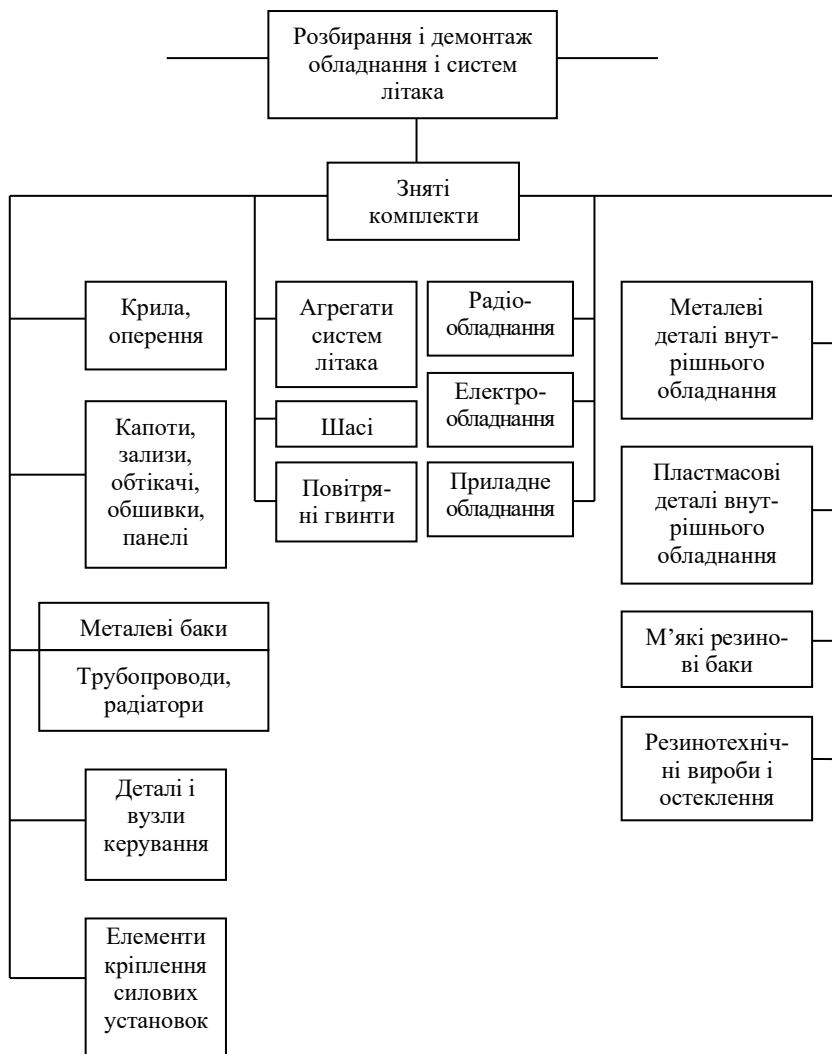


Рис. 2.7. Наближений склад комплектів для ремонту турбогвинтового транспортного літака

Одночасно з ремонтом демонтованих компонентів на лінії ремонту літака проводиться ремонт фюзеляжу, центроплана і незнімних деталей та вузлів.

Раціональне розчленування об'єкта ремонту на комплекти і групи дозволяє забезпечити більш вузьку спеціалізацію робіт, створює кращі умови для механізації технологічних процесів, підвищення продуктивності праці і якості ремонту, а також є основою для вибору оптимальних принципів організації виконання і схем технологічного процесу ремонту.

Аналіз технологічних процесів, діючих на авіаремонтних підприємствах і підприємствах суміжних галузей машинобудування, показує, що схеми технологічних процесів можуть істотно розрізнятися за принципом організації виконання технологічного процесу (технологічний, предметний, змішаний), за розбиттям на етапи, фази, операції, за методом ремонту (індивідуальний, бригадний, бригадно-вузловий, потоковий) і за характером виконання (послідовний, паралельний, послідовно-паралельний).

Принципи організації виконання технологічного процесу відіграють важливу роль у розробленні організаційно-виробничої структури авіаремонтного підприємства, компонуванні його цехів, виробних дільниць, плануванні розташування обладнання.

Технологічний принцип організації передбачає виконання відповідних етапів і фаз технологічного процесу ремонту на спеціалізованих виробничих дільницях і у спеціалізованих цехах. Найбільш доцільним є послідовне переміщення об'єктів ремонту через дільницю (цех).

Відповідно до предметного принципу організації весь цикл технологічного процесу ремонту виробу або окремих комплектів здійснюється в одному спеціалізованому цеху чи на одній спеціалізованій дільниці.

Змішаний або предметно-технологічний принцип організації передбачає виконання основних технологічних процесів (етапів, фаз) за предметним принципом, а інших – за технологічним.

Характерні схеми розчленування технологічного процесу ремонту літака для зазначених принципів організації його виконан-

ня зображено на рис. 2.8–2.10. Пунктирними лініями на схемах умовно позначені виробничі дільниці, а прямокутниками, окресленими суцільними лініями, – етапи технологічного процесу на основній лінії ремонту і лінії ремонту комплектів.

Предметна організація виконання технологічного процесу (рис. 2.8) дає змогу істотно скоротити вантажопотоки з переміщення деталей і вузлів по цехах і виробничих дільницях, спеціалізувати робочі місця для ремонту мінімальної номенклатури деталей і вузлів, упроваджувати потокові методи ремонту з високим рівнем механізації процесів, значно знизити трудомісткість і скоротити цикл ремонту АТ. Одночасно спрощуються системи матеріально-технічного забезпечення, обліку і контролю виробництва, підвищується відповідальність виконавців за терміни і якість виконання ремонту.

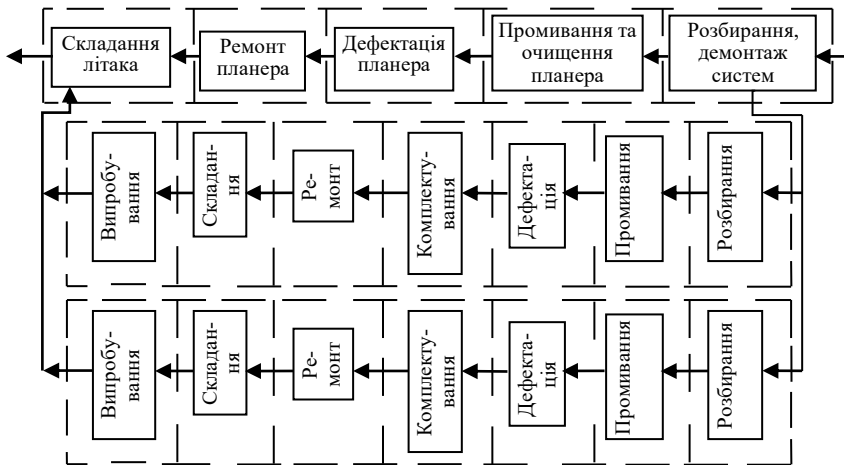


Рис. 2.8. Схема розчленування технологічного процесу ремонту літака за предметним принципом організації виконання технологічного процесу

Разом з цим предметний принцип організації потребує зосереження на одній виробничій площі всього необхідного для ремонту виробу комплексу технологічного обладнання. Для виконання окремих процесів, таких, як промивання і очищення, зварювальні

роботи, гальванічні процеси, фарбування та інші, потребується створення окремих, ізольованих дільниць і робочих місць з особливими умовами праці і техніки безпеки.

Організація технологічного процесу згідно з технологічним принципом (рис. 2.9) доцільна у випадках, коли за предметної організації неможливо забезпечити досить повне завантаження виконавців і обладнання, а також коли технологічні процеси у зв'язку з їх складністю і особливими умовами праці та техніки безпеки більш доцільно зосередити на одній виробничій дільниці або в окремому приміщенні.

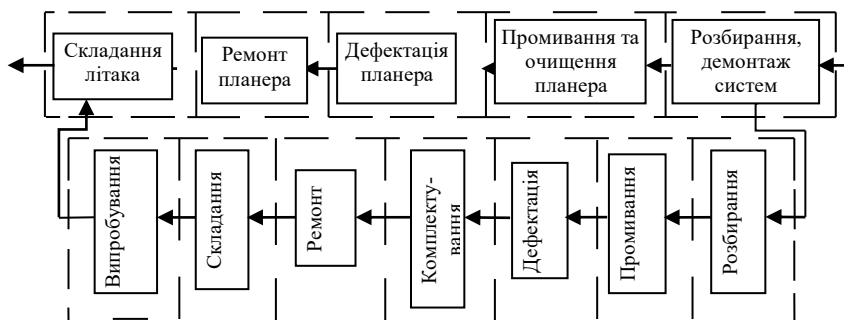


Рис. 2. 9. Схема розчленування технологічного процесу ремонту літака за технологічним принципом організації виконання технологічного процесу

За технологічним принципом, наприклад, організуються верстатно-механічні, термічні, гальванічні дільниці, дільниці з відновлення деталей газотермічними методами тощо. У випадку невеликих масштабів виробництва організація на підприємстві таких централізованих дільниць забезпечує кращу спеціалізацію працівників і завантаження обладнання.

Змішаний предметно-технологічний принцип (рис. 2.10) дозволяє використати переваги як предметного, так і технологічного принципу організації виконання технологічного процесу.

За цим принципом для неосновних процесів, процесів, що потребують дотримання особливих умов праці і техніки безпеки та складних процесів, що мають істотну відмінність від основних

технологічних завдань передбачаються централізовані дільниці з організацією їх за технологічним принципом із розташуванням таких дільниць поблизу ліній технологічного потоку ремонту комплексів, груп, виокремлених за предметною організацією.

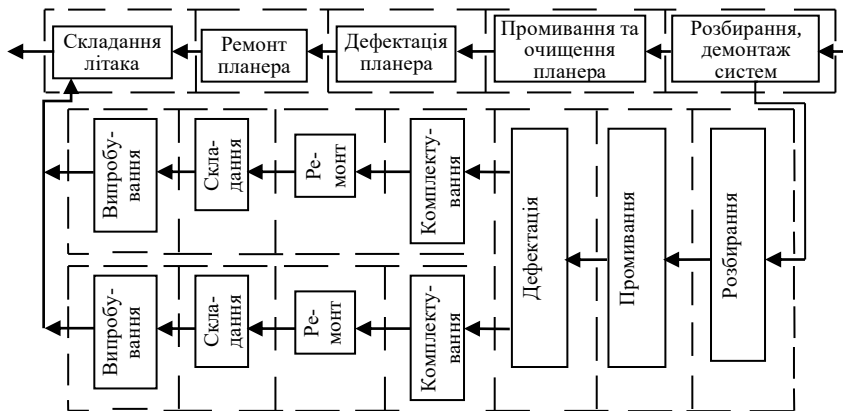


Рис. 2.10. Схема розчленування технологічного процесу ремонту літака за змішаним (предметно-технологічним) принципом організації виконання технологічного процесу

Розчленування на етапи, фази, операції, яке передбачається в схемах технологічного процесу, має за мету виявити необхідні для ремонту АТ виробничі дільниці і робочі місця, визначити можливу паралельність та послідовність процесів і їх взаємозв'язки з урахуванням скорочення циклу ремонту. Під час розроблення схем технологічного процесу ремонту АТ рекомендується такий порядок розчленування на етапи, фази і операції.

На основній лінії ремонту ПС чи АД, де весь процес здійснюється поточковостендовим методом безперервно і послідовно на ряді стендів, весь обсяг ремонту розбивається на відповідні етапи. При цьому кожен стенд спеціалізований на виконання робіт одного етапу. За значного завантаження один етап може виконуватись паралельно на декількох стендах або на декількох стендах послідовно зі спеціалізацією кожного стенда на виконання частини етапу. Технологічний процес на кожному стенді проводиться відповідно до стендової технологічної карти, яка передбачає

розчленування етапу або частини етапу на операції. Послідовність і паралельність виконання операцій на стендах мають відповідати установленому ритму потокової лінії.

Ремонт комплектів і груп, який виконується за технологічним і змішаним предметно-технологічним принципами, поділяється на етапи, фази і операції. У фази об'єднуються операції, які виконуються на спеціалізованих дільницях за аналогічними технологічними методами, на аналогічному обладнанні і працівниками однієї спеціалізації.

Ремонт комплектів і груп, який виконується відповідно до предметного принципу, поділяється лише на етапи і фази. В цьому випадку комплекс операцій, що виконуються на тому чи іншому етапі за технологічним методом, обладнанням і спеціалізацією виконавців, характеризуються істотною відмінністю, виконуються на предметній виробничій дільниці і не можуть вважатись фазами.

Етапи і фази мають поділятися з урахуванням виділення в схемі операцій, що потребують за умовами праці і техніки безпеки окремих, ізольованих, спеціалізованих робочих місць, або виробничих дільниць чи цехів. Розробляючи схеми технологічного процесу, необхідно також передбачати можливість виконання паралельних (одночасних) і паралельно-послідовних операцій для скорочення тривалості виконання етапів і маршрутів транспортування об'єктів ремонту.

Розділ 3. ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ОРГАНІЗАЦІЇ РЕМОНТУ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

Незважаючи на те, що не всі форми ТО і ремонту АТ, які використовуються закордонними компаніями, можуть бути застосованими в теперішніх умовах, досвід роботи деяких із них заслуговує уваги.

За кордоном принцип експлуатації за ресурсом майже не використовується. При цьому до мінімуму скорочені роботи з ТО та ремонту, що виконуються за напрацюванням без попереднього контролю технічного стану АТ. Так, США, Японія, Франція успішно застосовують прогресивну систему ТО та ремонту АТ. Відповідно до цієї системи всі без винятку ремонтні роботи виконуються під час ТО. Поняття «капітальний ремонт» не використовується.

Система ремонту розробляється переважно фірмою-розробником на етапі проектування і відображається в офіційних документах. Найбільшого поширення набули системи блокового безперервного ремонту. При цьому більшість готових виробів не мають призначених ресурсів. Їх ремонт проводиться доти, доки вартість ремонту не буде близькою до вартості нового виробу.

Програма послідовного ремонту та вибіркового контролю більш ефективна і динамічніша ніж програма ремонту за ресурсом, оскільки вона дозволяє своєчасно виявляти та усувати несправності і дефекти, більш рівномірно розподіляти завантаження ремонтно-технологічної бази і може бути спланована з урахуванням усіх видів перевірних і відновлювальних робіт. Процес визначення технічного стану і обсягу робіт з ремонту АТ здійснюється на базі широкомасштабного контролю за прогнозними параметрами і застосування евристичних методів оцінювання висококваліфікованими спеціалістами, які мають великий досвід роботи з експлуатації та ремонту певного типу АТ. Особлива увага приділяється визначенню для кожного випадку несправності і дефекту економічно-доцільного обсягу робіт з їх усунення, а в основу визначення періодичності ремонтів покладено адаптивні методи, які в міру нагромадження інформації про властивості і стан АТ дозволяють пристосовувати систему ремонтів до умов експлуата-

ції і конструктивно-технологічних особливостей АТ з наступним переходом до системи ремонтів, оптимальних для кожного конкретного типу АТ. Застосування такого принципу потребує безперервного удосконалення засобів діагностування АТ, широкого застосування автоматизованих систем контролю і відповідних досліджень наукового та прикладного характеру.

Планові капітальні ремонти АТ із збереженням терміну їх проведення також відіграють важливу роль, особливо на ранній стадії експлуатації нового типу ПС і АД. Капітальний ремонт забезпечує отримання максимального обсягу інформації про стан різних вузлів і елементів ПС і АД, можливість для проведення доробок та модифікацій АТ, заміни деталей та вузлів, які у зв'язку з недостатньою технологічністю конструкції не можуть бути замінені під час ТО.

У практиці ремонту АТ передових закордонних фірмах, особливо ремонту авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД), спостерігається тенденція до створення спеціалізованих ремонтних підприємств, які спеціалізуються на ремонті окремих вузлів і деталей. Найбільшого поширення набула предметна спеціалізація, коли на одному підприємстві зосереджується ремонт невеликої номенклатури однотипних за конструктивно-технологічними ознаками деталей і конструктивних елементів одного найменування. Так, фірма «Інтертурбін» (США) спеціалізується на ремонті деталей гарячого тракту ГТД, зокрема, таких, як робочі і соплові лопатки турбін. Ремонт виконується за уніфікованими за типорозмірами лопаток типовими технологічними процесами, що дозволяє відновлювати лопаті різних типів ГТД. Деякі фірми у США, Германії, Голландії спеціалізуються на ремонті корпусних вузлів ГТД – напрямних апаратів компресора, камер згоряння, сопел, ущільнень компресора і турбіни тощо. Такі спеціалізовані ремонтні підприємства, як правило, обслуговують ремонт широкої сім'ї АД. У середньому під час ремонту АД закордонного виробництва усуваються пошкодження і відновлюється до 60% усіх деталей [8].

Вузька спеціалізація і організація централізованого ремонту окремих вузлів і деталей потребує для забезпечення ритмічного ремонту АТ установлення тісних взаємозв'язків і налагодження чіткої координації співпраці спеціалізованого ремонтного підприємства з усією системою ремонтних підприємств і авіакомпаній,

які задіяні у виконанні спільної програми ремонту. Водночас, як свідчить досвід закордонних компаній, організація такого ремонту цілком виправдовує себе. При цьому забезпечується висока мобільність технологічного переоснащення ремонтних підприємств у зв'язку з введенням в експлуатацію нових зразків АТ, нових прогресивних технологічних процесів (ТП) ремонту. Одночасно за рахунок застосування новітніх технологій, предметної спеціалізації та централізації підвищується якість, скорочуються тривалість і собівартість ремонту, забезпечуються умови для створення обмінного фонду відновлених деталей і вузлів.

На вітчизняних авіаремонтних підприємствах і авіаремонтних підприємствах країн СНД натеper зберігаються індивідуальні принципи ремонту АТ, коли весь обсяг ремонтних робіт конкретного типу ПС чи АД в основному виконується силами самого ремонтного підприємства, а відновлені і відремонтовані деталі та вузли підлягають установленню на ту машину, до якої вони належали. За такого принципу організації ремонту через недостатню кількість однотипних за конструктивно-технологічними ознаками деталей обмежуються можливості формування на одному підприємстві груп типових деталей для організації єдиного типового чи групового ТП їх ремонту. Розширення номенклатури відновлюваних деталей та ускладнення ТП, що застосовуються під час ремонту АТ, потребують більш широкого застосування типових і групових процесів ремонту. У цьому сенсі перспективним напрямом розвитку авіаремонтного виробництва може бути організація на умовах кооперування централізованих дільниць з ремонту певної номенклатури типових деталей за єдиним типовим або груповим ТП. Реалізація такої форми організації ремонту буде сприяти скороченню кількості оригінальних одиничних ТП, зниженню обсягу необхідних технологічних розробок, більш ефективному використанню технологічного обладнання.

В умовах індивідуального ремонтного виробництва і невеликих обсягів ремонту за кожним конкретним типом АТ формування груп деталей з метою розроблення типових і групових ТП їх ремонту на основі існуючого принципу конструктивно-технологічної подібності не є достатньо ефективним. Критерієм, який об'єднував би деталі у відповідні групи, у тому числі деталі різних типів АТ, може бути групування за схожістю дефектів, на усунення яких можна розробити єдиний ТП [9].

Принцип групування за схожістю дефектів передбачає класифікацію деталей за функціональними ознаками, які характеризують умови виникнення дефектів. Так, для елементів конструкцій ГТД можна виокремити три рівні функціональних ознак: рівень зовнішніх температурних впливів; рівень зовнішніх силових впливів; рівень передачі руху та забезпечення контактів у кінематичних парах, рухомих і номінально нерухомих з'єднаннях. У свою чергу кожен рівень може складатися з декількох груп ознак. Так, першому функціональному рівню – рівню впливу зовнішніх температур, відповідають групи ознак, які визначають характер дефекту за впливом на деталь температурних режимів експлуатації. Другий функціональний рівень – рівень зовнішніх силових впливів, складається із групи ознак, що характеризують вид силових навантажень: розтяг, стиснення, згин, кручення, зрізання, вібрація. Третій функціональний рівень – рівень передачі руху та забезпечення контактів у кінематичних парах, рухомих та номінально нерухомих з'єднаннях складається із групи ознак, що характеризують умови контактної взаємодії: вид тертя, характер руху, тип контактних поверхонь, вид контакту.

Кожен із функціональних рівнів вирізняється своєю специфікою виникнення експлуатаційних дефектів та відповідно способом їх усунення.

Особливістю першого функціонального рівня є впливи на деталі високих температур, агресивного високотемпературного газового потоку, температурних перепадів і градієнтів температур, які спричиняють утворення таких дефектів, як прогар, короблення, термічні та термовтомні тріщини. Оскільки температурні дефекти одночасно пов'язані зі зміною структури і фізико-механічних властивостей матеріалів, то для відновлення таких деталей технологічні процеси з усунення дефектів також повинні включати методи відновлення фізико-механічних властивостей.

Для другого функціонального рівня – рівня зовнішніх силових впливів – характерні дефекти, зумовлені втратою міцності та залишковою деформацією, що виникають під дією циклічних, статичних і ударних навантажень. Усуненню таких дефектів відповідають види технологічних процесів відновлення міцності та геометричної форми деталей: зварювання, рихтування, зміцнення методами поверхневого пластичного деформування, усталювання різного типу підсилювачів, релаксація напружень тощо.

Для третього функціонального рівня – рівня передачі руху та забезпечення контактів у кінематичних парах, рухомих та номінально нерухомих з'єднаннях – найбільш характерними дефектами є дефекти, спричинені зношуванням робочих поверхонь деталей, яким відповідають види технологічних процесів з відновлення поверхневого шару: механічне оброблення на ремонтний розмір, компенсація зношеного шару нанесенням додаткового матеріалу.

Залежно від конструктивно-технологічних особливостей деталі для кожного поєднання ознак у межах одного функціонального рівня можна виділити підвид технологічного процесу, який являє собою технологічно можливий і найбільш ефективний метод відновлення. Так, наприклад, вид технологічних процесів з відновлення поверхневого шару залежно від величини зносу, матеріалу деталі, вимог до забезпечення необхідних властивостей поверхні та деталі в цілому може складатись із технологічних методів електролітичного хромування, наплавлення, різних методів газотермічного напилювання тощо.

Таким чином, групування деталей за схожістю дефектів з урахуванням функціонально технологічних ознак дозволяє подати об'єкт ремонту (ПС, АД) набором ремонтних груп деталей, об'єднаних відповідним технологічним методом ремонту. Такий підхід дає змогу більш ефективно вирішувати завдання побудови типових і групових ТП ремонту, організації потокових технологічних ліній та спеціалізованих дільниць з відновлення деталей. Проте його реалізація можлива на основі глибокого аналізу дефектів, вивчення природи їх виникнення, створення відповідних інформаційних баз даних в автоматизованих системах технологічної підготовки авіаремонтного виробництва.

Розділ 4. ХАРАКТЕРНІ ДЕФЕКТИ ДЕТАЛЕЙ І ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН ТА АВІАДВИГУНІВ

Одне із головних завдань ремонту АТ полягає в усуненні дефектів і відновленні працездатного стану та ресурсу об'єктів ремонту.

Дефекти деталей та вузлів АТ за походженням поділяють на конструктивні, виробничі, експлуатаційні та дефекти зберігання. Експлуатаційні дефекти та дефекти, що виникають під час зберігання, усувають у процесі ремонту шляхом відповідних технологічних ремонтних впливів, які забезпечують надання деталям і конструктивним елементам попередньо наданих якісних характеристик та властивостей. Дефекти конструктивно-виробничого походження усувають шляхом виконання під час ремонту необхідних доопрацювань і модернізацій, що проводяться відповідно до бюлетенів розробника та заводу-виготовлювача.

Серед експлуатаційних дефектів найбільш небезпечними є дефекти втомного руйнування, що розвиваються в часі під дією циклічно змінних напружень. При втомі відбуваються незворотні зміни структури і властивостей матеріалів, які призводять до зародження, розвитку тріщин і руйнування. В умовах циклічного навантаження працюють більшість відповідальних деталей і конструктивних елементів ПС і АД, тому втома є одним із основних факторів, що обмежує їх ресурс.

Натепер існують різні теорії щодо фізичної природи втомного руйнування. Найбільш прийнятною вважається теорія вакансійно-дислокаційного механізму зародження мікротріщин [10]. Сам процес нагромадження втомних пошкоджень необхідно розглядати як монотонний стохастичний процес, середня швидкість якого зменшується з часом. Такій моделі відповідає логарифмічно нормальний розподіл довговічності, щільність імовірностей $f(t)$ і функцію розподілу $F(t)$ якого можна виразити у вигляді [4; 11]:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma_i t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\ln t - a_i}{2\sigma_i^2}};$$

$$F(t) = \Phi \frac{\ln t - a_i}{\sigma_i},$$

де a_i, σ_i – параметри, що відображають відповідно математичне сподівання і середньоквадратичне відхилення логарифма безвідмовної роботи.

Розрізняють малоциклову і багатоциклову втоми. За малоциклової втоми руйнування відбувається за порівняно невеликої кількості циклів навантаження, яка в більшості випадків не перевищує $N = 10^2 \dots 10^5$. Руйнування при цьому розвивається на фоні значних пружно-пластичних деформацій.

За багатоциклової втоми руйнування розвивається без помітних слідів пластичної деформації, якщо кількість циклів навантаження $N > 10^5$. Типову криву втоми (криву Велера), яка показує залежність кількості циклів до руйнування N від максимального напруження циклу σ за симетричного знакозмінного циклу побудовану в логарифмічних координатах для вуглецевої сталі, показано на рис. 4.1.

Якщо кількість циклів $N > N_0$ (для сталей $N_0 \sim 10^6 \dots 10^7$), крива має горизонтальну ділянку і матеріал може витримувати необмежену кількість циклів без руйнування. Максимальне напруження циклу, яке не спричиняє втомного руйнування, називають фізичною границею втоми.

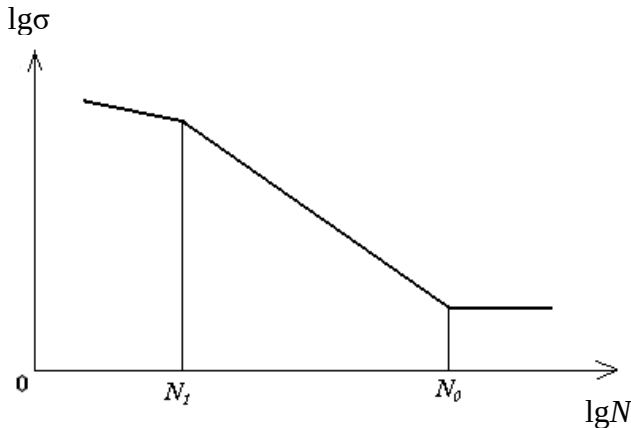


Рис. 4.1. Типова крива втоми для вуглецевої сталі

Рівняння кривої втоми для $N_1 < N < N_0$ має вираз [12]:

$$\sigma^m N = c,$$

де m, c – константи, що залежать від властивостей матеріалу, температури та характеру навколишнього середовища.

Області $N < N_1$ ($N_1 \sim 10^3 \dots 10^4$) відповідає малоциклове втомне руйнування. Малоциклова втома характеризується значними ефектами зміцнення та розміцнення металу за рахунок інтенсивної пластичної деформації, яка відбувається за високих напружень циклу змінного навантаження. Рівняння кривої втомного руйнування в ділянці малоциклової втоми для вуглецевої сталі має вираз, подібний до багатоциклової втоми [12]:

$$\sigma^{m'} N = c'.$$

Не залізні конструкційні сплави, такі як алюмінієві, магнєві, титанові, хромонікелеві, а також сплави на основі заліза за високих температур і в агресивних середовищах не мають фізичної границі втоми і їх втомне руйнування розвивається також за умови, що $N > N_0$. Опір матеріалів втомі в такому випадку оцінюють обмеженою границею втоми, яка визначається на базі випробувань $N = 10^7 \dots 10^8$ циклів.

Значному зниженню циклічної міцності та відповідно підвищенню імовірності втомного руйнування деталей і елементів конструкцій ПС і АД сприяють корозійні пошкодження. Існує декілька класифікацій корозії: за фізико-хімічним механізмом процесу взаємодії металу і середовища; за характером зовнішнього середовища та за характером зовнішнього прояву корозійного руйнування.

За фізико-хімічним механізмом процесу взаємодії металу і середовища розрізняють хімічну і електрохімічну корозію. Хімічна корозія зумовлюється взаємодією металу із зовнішнім середовищем за механізмом хімічних реакцій. Розвиток електрохімічної корозії пов'язаний з процесами електролізу, який виникає на поверхні металів за наявності вологи, водного розчину солей та інших електролітів.

За характером зовнішнього середовища розрізняють атмосферну корозію, корозію в середовищі робочих рідин (рідинна корозія) та газову корозію.

Атмосферній корозії в основному піддаються деталі відкритих частин ПС і АД із некорозійностійких сталей, алюмінієвих та

деяких інших кольорових сплавів, які перебувають у безпосередньому контакті з атмосферою і які зазнають дії вологи та забрудненого газом і пилом повітря.

Рідинна корозія характерна для деталей гідравлічних, паливних та мастильних систем і спричинена дією на метал агресивних компонентів робочих рідин.

Газовій корозії піддаються деталі, які містяться в атмосфері гарячого повітря або атмосфері гарячих газів продуктів згоряння палива.

За характером зовнішнього прояву корозійного руйнування виділяють рівномірну корозію, місцеву корозію, структурно вибірккову і міжкристалічну корозію. Останній вид корозії щодо впливу на міцність деталей є найбільш небезпечним. Міжкристалічній корозії піддаються хромисті та хромонікелеві сплави, а також сплави алюмінію, які широко застосовуються в конструкції АТ.

Механізм виникнення міжкристалічної корозії пов'язують із структурними змінами, що відбуваються на межах зерен, особливо під час термічного оброблення і зварювання. Так, міжкристалічна корозія аустенітних сталей є наслідком збіднення хромом меж зерен аустеніту, що пов'язано зі зміною розчинності в аустеніті вуглецю за різних температур. В агресивному середовищі збіднені хромом межі зерен інтенсивно розчиняються за механізмом електрохімічної корозії, що призводить до втрати міжзеренного зчеплення, а отже до зниження міцності сталі.

У алюмінієвих сплавах з умістом міді близько 4%, які для досягнення високої міцності піддаються спеціальному термічному обробленню, старінню, по межах зерен виділяються інтерметаліди CuAl_2 . Утворення CuAl_2 супроводжується збідненням меж зерен міддю, результатом чого стає інтенсивне міжкристалічне руйнування сплавів в агресивному середовищі.

До окремого виду втоми належить термічна втома, під якою розуміють виникнення тріщин і руйнування матеріалів під дією циклічних термічних напружень. Основною причиною виникнення термічних напружень є опір термічному розширенню та градієнти температур, що виникають у деталях та конструктивних елементах унаслідок зміни температурного режиму експлуатації. Термічній втомі зазнають диски, робочі і соплові лопатки турбіни, елементи жарових труб камер згоряння та інші деталі гарячої частини ГТД.

Аналіз фізичної природи термічної втоми показує, що пошкодження матеріалу під дією циклічних температурних напружень, як і у випадку звичайної механічної втоми, є наслідком нагромадження дефектів кристалічної ґратки та утворення і розвитку мікротріщин [13].

На деталі гарячої частини ГТД, поряд з дефектами від термічної втоми, під дією високих температур, теплових і високотемпературного газового потоку продуктів згоряння палива можуть накладатись такі дефекти, як залишкова деформація і руйнування від повзучості, жолоблення, дефекти від високотемпературної газової корозії і ерозії.

Повзучості і руйнування від повзучості головним чином зазнають диски, робочі та соплові лопатки газових турбін ГТД. Крім прямого прояву, повзучість може також викликати опосередковане руйнування деталей. Так, відомі випадки, коли внаслідок «вибирання» передбачених зазорів між робочими лопатками і корпусом турбіни в результаті повзучості матеріалу лопаток і дисків відбувалось руйнування лопаток. Наслідком повзучості може бути релаксація напружень у болтових з'єднаннях і з'єднаннях з натягом, що призводить до втрати щільності з'єднань і виникнення додаткових непередбачених навантажень.

Основна характеристика повзучості – це умовна межа повзучості $\sigma_{0,2}^t / \tau$, яка визначається напруженням, що викликає величину залишкової деформації 0,2 % за час τ за температури t , а основною розрахунковою характеристикою на міцність конструктивних елементів, що піддаються тривалому статичному навантаженню за підвищених температур, є границя тривалої міцності σ_b / τ_p – напруження, яке спричиняє руйнування через час τ_p за постійної температури. У загальному випадку час до руйнування, як і час до нагромадження заданої залишкової деформації повзучості, описується логарифмічним нормальним законом розподілу, а величина часу до руйнування визначається таким співвідношенням [14]:

$$\tau_p = \frac{A}{\sigma^m},$$

де A , m – константи для матеріалу і температури.

Типовими дефектами від газової корозії є дефекти типу «пропалення», які найбільш характерні для тонкостінних деталей, таких як, наприклад, жарові труби камер згоряння. При дефектації деталей гарячої частини ГТД особлива увага приділяється наявності ознак сульфідно-оксидної корозії робочих і соплових лопаток турбіни, виготовлених із жароміцних нікелевих сплавів. Причиною розвитку сульфідно-оксидної корозії є наявність у продуктах згоряння лужних металів і сірки. Пошкодження сульфідно-оксидною корозією можуть проникати на значну глибину, що призводить до окрихчування, утворення тріщин і руйнування лопаток.

Газова ерозія зумовлюється дією на поверхню металу високошвидкісного газового потоку і є мало не одним із самих поширених видів ерозійного руйнування конструктивних елементів АД. Газової ерозії зазнають поверхні робочих і соплових лопаток турбін, жарові труби камер згоряння, деталі газоуловлювачів, елементи подовжувальних труб, форсажних камер, соплових пристроїв, систем реверсу тяги і шумоглушіння ГТД.

У поршневих АД газова ерозія є причиною виникнення дефектів на сідлах і клапанах механізму газорозподілення, вихлопних патрубках, а також є істотною складовою зносу поршневих кілець, поршня і дзеркала циліндра.

Інтенсивність газової ерозії підсилюється дією високих температур і хімічно-активних компонентів газового середовища. Залежно від співвідношення розмірів деталі і діючого газового потоку, напрямку потоку характер руйнування поверхні може бути у вигляді різної форми і розміру поздовжніх борозн, спрямованих у напрямку потоку, або окремих локальних руйнувань, що розвиваються перпендикулярно до потоку.

Особливо інтенсивне ерозійне руйнування і зношування поверхні металів відбуваються за наявності у газовому потоці твердих абразивних частинок. Основними кінематичними параметрами, які визначають характер руйнування і інтенсивність зношування є кінетична енергія і кут падіння абразивних частинок на поверхню. За нормального удару, коли вектор швидкості частинок направлений перпендикулярно до поверхні деталі, зносостійкість поверхні визначається опором мікрооб'ємів поверхневого шару втомному, полідеформаційному і крихкому руйнуванню, а також здатністю

матеріалу поглинати кінетичну енергію удару частинок за рахунок пружної деформації. Якщо кути падіння (кути атаки) частинок на поверхню гострі, величина їх ударного імпульсу знижується. Матеріал пошкоджується шляхом зрізу і відриву з поверхні дрібних частинок з утворенням подряпин.

Газоабразивного зношування під ударною дією твердих частинок, що містяться у набіглому потоці повітря, зазнають передня кромка крила і хвостового оперення літаків, елементи механізації крила, що випускаються під час посадки, лопаті несучих гвинтів гелікоптерів і повітряних гвинтів турбогвинтових літаків та літаків з поршневіми двигунами, деталі повітрозбірників і газоповітряного тракту ГТД

Під час експлуатації на різних деталях і елементах конструкцій ПС і АД під дією ударних та надмірно високих статичних і циклічних навантажень можуть виникати також такі дефекти механічного походження, як залишкова деформація, об'ємні руйнування, забоїни, сколи, механічні нагартування тощо. Так наприклад, значна залишкова деформація може виникати на елементах конструкцій планера літака у разі потрапляння в зону високої турбулентності і здійснення «грубої» посадки; забої і сколи елементів газоповітряного тракту ГТД у випадку потрапляння сторонніх предметів; поверхневі дефекти деталей у наслідок механічного нагартування через послаблення болтових з'єднань та надмірне збільшення зазору в результаті зношування деталей спряжень. Такі дефекти належать передусім до непередбачуваних важкопрогнозованих дефектів, які зумовлені виникненням «нештатних» ситуацій або порушенням нормальних режимів роботи деталей.

Більшість важконавантажених і відповідальних деталей та елементів конструкції ПС і АД з дефектами втомного та термовтомного походження, глибокими корозійними і механічними пошкодженнями, значною залишковою деформацією належать до невідновлюваних об'єктів.

Багаторічний досвід ремонту та аналіз результатів оцінювання технічного стану АТ за останні роки [15–17] свідчать, що в загальній кількості дефектів деталей ПС і АД значне місце посідають дефекти трибологічного походження, пов'язані з різного роду пошкодженням та зносом контактних поверхонь деталей вузлів

тертя. Такі дефекти притаманні основному масиву деталей, які під час ремонту підлягають відновленню, а також становлять один з основних видів дефектів, які спричиняють виникнення несправностей і відмов АТ у процесі експлуатації.

Узагальнені дані кількісного розподілу деталей за видом експлуатаційних дефектів, отримані за результатами дефектації під час ремонту середньомагістральних турбогвинтових літаків сім'ї Ан і одного із газотурбінних АД, показано на рис. 4.2 і 4.3. Під час проведення аналізу за кожним об'єктом АТ враховувались лише ті дефекти, які стали причиною забракування деталей і мали високий відсоток повторності. Кількісна оцінка проводилася за коефіцієнтом пошкоджуваності:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^K n_i}{N},$$

де $\sum_{i=1}^K n_i$ – кількість пошкоджених деталей за i -м дефектом, N – загальна кількість пошкоджених деталей конструкцій.

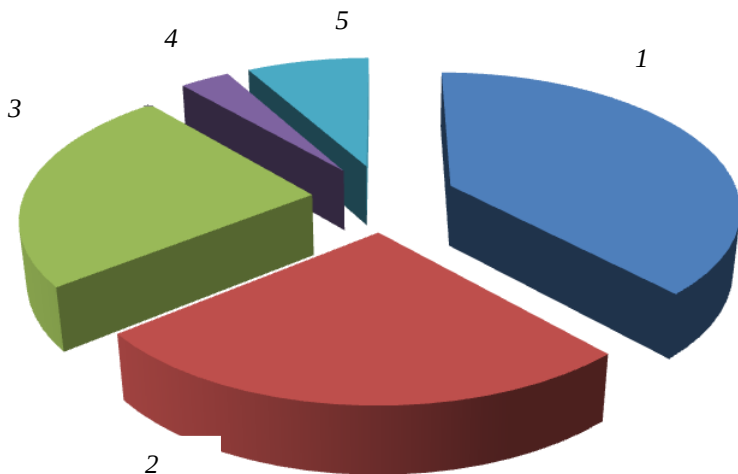


Рис. 4.2. Діаграма кількісного розподілу деталей за видами експлуатаційних дефектів на літаках: 1 – тріщини, руйнування (38,20 %); 2 – корозія (26 %); 3 – дефекти зношування (14,40 %); 4 – деформація (3,30 %); 5 – інші (8,10 %)

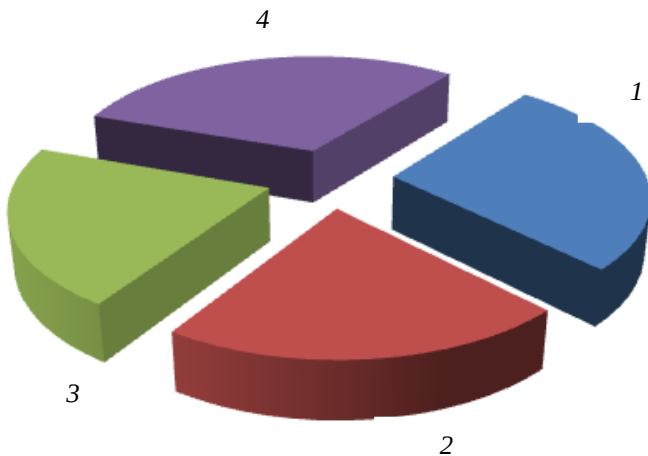


Рис. 4. 3. Діаграма кількісного розподілу деталей за видами експлуатаційних дефектів на ГТД: 1 – дефекти зношування (27 %); 2 – механічні нагартування, забоїни, сколи (21,6 %); 3 – тріщини руйнування (21,3 %); 4 – інші (30,1 %)

Як видно, у групі літаків частка деталей, виникнення дефектів яких зумовлено зношуванням, становить близько 25 % і у загальній кількості дефектних деталей займає третє місце після деталей з такими дефектами, як тріщини, руйнування та корозія.

У загальній кількості дефектних деталей ГТД деталі з дефектами зношування складають близько третини.

Характерною особливістю конструктивного виконання і умов роботи деталей вузлів тертя конструкцій ПС і АТ є велика різноманітність матеріалів і поєднання матеріалів у парах тертя, геометрії контакту та умов фрикційно-контактного навантаження. Для надання робочим поверхням деталей і парам тертя необхідних триботехнічних властивостей застосовуються різні способи поверхневого оброблення і захисні покриття, способи мащення, види та асортимент мастильних матеріалів.

За встановленими класифікаційними ознаками [18] у вузлах тертя авіаційних конструкцій реалізуються майже всі види зовнішнього тертя і види зношування контактних поверхонь [19; 20]. Зношуються як деталі рухомих, так і номінально нерухомих з'єднань. При цьому не тільки змінюються розміри деталей, але і мікро- та макрогеометрія поверхонь трибоконтакту, структура і фізико-механічні властивості поверхневого шару матеріалів трибопар. Усі ці процеси порушують умови нормального функціонування і призводять до втрати працездатності деталей вузлів тертя.

Розділ 5. АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ФРИКЦІЙНО-КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ТА ОСНОВНИХ ВИДІВ ЗНОШУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНИХ ТРИБОСИСТЕМ

Проблема забезпечення високого рівня надійності та довговічності АТ безпосередньо пов'язана з проблемами тертя та зношування і потребує насамперед комплексного вирішення завдань з підвищення зносостійкості деталей вузлів тертя. Цій же проблемі підпорядковані завдання відновлення зношених деталей під час ремонту.

Вивчення та опис процесів тертя і зношування є областю досліджень трибології (від грец. *tribos* – тертя), а об'єктом трибологічних досліджень – трибологічні системи (трибосистеми).

5.1. Структура і функції трибологічних систем

Трибологічною системою називають складну термодинамічну систему, у якій відбуваються процеси контактної взаємодії тіл тертя за участю проміжного мастильного та навколишнього газового середовища. Трибологічні системи можуть бути механічними та немеханічними (наприклад, біологічними).

Для вивчення процесів тертя та зношування в технічних об'єктах застосовують поняття «триботехнічна система» спрощено «трибосистема», під яким розуміють, що така система утворюється елементами вузлів тертя об'єктів технічного призначення.

Процеси, що відбуваються в трибосистемах, можна відобразити структурною схемою, показаною на рис. 5.1 [21]. У загальному випадку трибосистема характеризується такими компонентами: технічною функцією TF , структурою S , сукупністю вхідних X та вихідних Y параметрів, параметрами збурення T та параметрами втрати ($Q; \Delta m$).

Структура S трибосистеми включає: сукупність елементів трибосистеми, їх властивості, взаємозв'язок між елементами.

Вхідні параметри X трибосистеми відображають спектр діючих на трибосистему зовнішніх факторів, які задаються: характером взаємного руху елементів трибосистеми; параметрами фрикційно-контактного навантаження чи його похідними (тиском, силою тертя, швидкістю ковзання, шляхом тертя); умовами експлуатації; умовами навантаження; зовнішнім середовищем тощо.

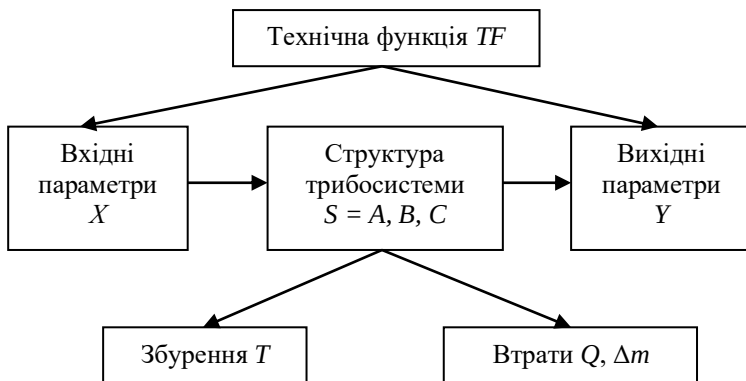


Рис. 5.1. Структура трибосистеми

Вихідні параметри Y визначають експлуатаційні характеристики, які для кожної трибосистеми можуть бути як загальними, так і специфічними.

Збурення T у трибосистемах виникають унаслідок тепловиділення в умовах тертя, фрикційних коливань та коливань, зумовлених зміною умов контактування, та внаслідок забруднення чи наявності в зоні тертя продуктів зношування тощо.

Втрати в трибосистемі пов'язані із двома чинниками: із втратою енергії Q унаслідок тертя та втратою маси Δm , що спричиняє зміну розмірів елементів трибосистеми внаслідок зношування.

Тертя, що здійснюється в трибосистемах за наявності відносного переміщення тіл, поділяють на тертя спокою і тертя руху.

Тертя спокою – це тертя двох тіл під час мікрозміщень до переходу їх у відносний рух. Тертя цього виду виникає у болтових, пресових та інших номінально-нерухомих з'єднаннях за умови відсутності між поверхнями елементів з'єднання відносного руху з проковзуванням.

Тертя руху виникає між двома тілами, що перебувають у відносному русі. Такого тертя зазнають поверхні тіл, що переміщуються одна відносно одної. За характером відносного руху тертя руху поділяють на тертя ковзання, тертя кочення, тертя кочення з проковзуванням, а за умовами контактування з контр тілом розділяють на тертя у вузлах та спряженнях і тертя при контактуванні виконавчих органів (деталей) машин з робочим середовищем. До останнього належать усі види контактної взаємодії, що спричи-

няють руйнування поверхонь деталей під силовою дією потоків рідини або газу (гідро- та газоабразивне зношування, ерозійне зношування в потоці високотемпературних газів тощо).

Кількісно тертя характеризується силою тертя і коефіцієнтом тертя. Формування сили тертя у трибосистемах ковзання зображено у вигляді графіка залежності зсувного зусилля F від лінійного зміщення тіл, що перебувають у контакті (рис. 5.2).

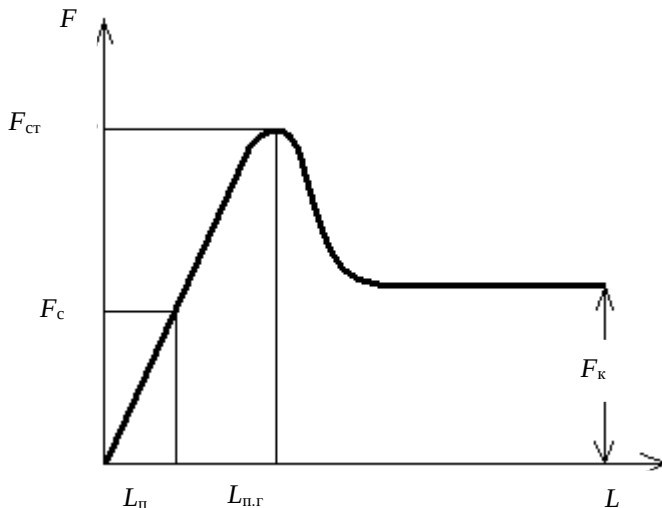


Рис. 5.2. Формування сил тертя у трибосистемах ковзання

Силою тертя спокою $F_{с}$ називають зсувне зусилля, яке прикладається до тіл, що перебувають у контакті, і яке не викликає їх взаємного ковзання. Взаємне переміщення тіл $L_{п}$, яке відбувається за рахунок пружної деформації мікроступів шорсткості контактних поверхнь, називають попереднім зміщенням.

Пружний характер деформування матеріалу мікроступів зумовлює зворотність попереднього зміщення. У разі зняття зсувного зусилля воно анулюється. У міру зростання зсувного зусилля деформування мікроступів набуває пластичного характеру і попереднє зміщення стає частково незворотним. Гранична величина попереднього зміщення $L_{п.г}$ і відповідне йому граничне значення прикладного зсувного зусилля $F_{ст}$ називають статичною

силою спокою. Із подальшого зростання зсувного зусилля починається ковзання, яке характеризується силою тертя ковзання F_k .

Силу тертя ковзання можна подати добутком питомої сили тертя τ і фактичної площі контакту A_t :

$$F_k = \tau A_t,$$

а коефіцієнт тертя ковзання відношенням сили тертя до діючого на контакт нормального зусилля N :

$$f = F_k / N.$$

Тертя кочення і тертя кочення з проковзуванням реалізуються у таких трибосистемах, як підшипники кочення, зачеплення шестерень, гвинтові кулькові механізми передачі руху та ін.

Формування сили тертя у трибосистемах кочення можна зобразити схемою, показаною на рис. 5.3.

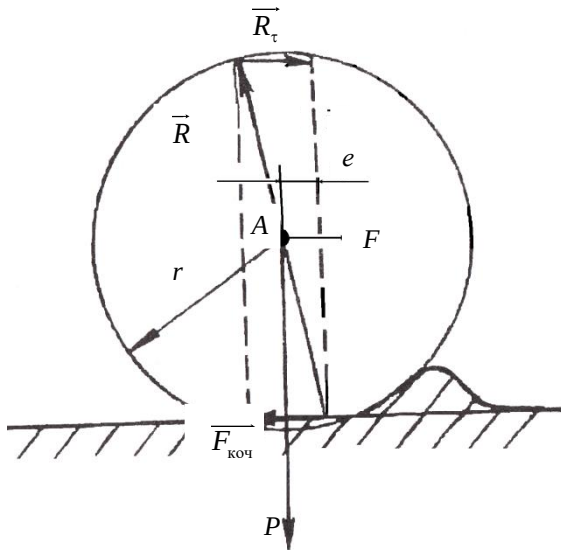


Рис. 5.3. Формування сили тертя у трибосистемах кочення

Під час кочення круглого циліндра або кулі по плоскій поверхні виникає деформація поверхневого шару матеріалу контртіла, унаслідок чого сила реакції поверхні $\vec{R}$ на прикладену в точці A силу P буде дещо зміщена вперед, а лінія сили $\vec{R}$ відхиляється від

вертикалі назад. Нормальна складова реакції $\vec{R} = \vec{P}$, а дотична складова $\vec{R}_t$ є силою опору перекочування:

$$\vec{F}_{\text{коч}} = \vec{R}_t.$$

Оскільки умови рівноваги $Pe = Fr = M_{\text{коч}}$, то коефіцієнт тертя кочення

$$f_{\text{коч}} = \frac{M_{\text{коч}}}{P} = e,$$

де $M_{\text{коч}}$ – момент тертя кочення; e – зміщення центра опорної поверхні від вертикалі (рис 5.3), яку називають плечем тертя кочення.

Коефіцієнт тертя кочення має розмірність довжини. Поряд з цією характеристикою використовується також безрозмірний коефіцієнт опору кочення, який визначається співвідношенням

$$f_{\text{о. коч}} = f_{\text{коч}} / r,$$

де r – радіус тіла кочення.

У разі чистого кочення двох абсолютно твердих тіл миттєві швидкості переміщень у точках дотику їх поверхонь повинні бути однаковими за величиною і напрямком. За деяких інших умов, наприклад під час кочення щільно охопленої поверхнею жолоба кулі, рівність миттєвих швидкостей у точках дотику порушується і взаємне переміщення поверхонь набуває змішаного характеру – кочення з проковзуванням.

За місцем локалізації процесу тертя розрізняють зовнішнє тертя, що виникає в зоні дотику зовнішніх поверхонь твердих тіл, внутрішнє тертя, що виникає між шарами оливи, рідини, рідкого металу, та внутрішнє тертя в металах під час їх деформування. Останній вид тертя пов'язаний з явищем недосконалої пружності поверхневих шарів металу через поширення в них генерованих в зоні дискретного фрикційного контакту хвиль деформацій і є одним з основних джерел дисипації (розсіювання) підведеної до трибосистеми механічної енергії [22].

За наявністю чи відсутністю в зоні трибоконтакту мастильного матеріалу виділяють тертя без мастильного матеріалу і тертя з мастильним матеріалом.

Тертя без мастильного матеріалу (сухе тертя) відбувається за відсутності на поверхні деталей введеного мастильного матеріалу будь-якого виду. Такий вид тертя здійснюється при контакті поверхонь, покритих оксидними плівками та найтонкішими шарами абсорбованих із навколишнього середовища молекул газів і води.

У класичних трибосистемах (окрім трибосистем фрикційного призначення – гальмівних трибосистем, трибосистем фрикційної передачі руху і т. ін) нормальний режим роботи пар тертя забезпечується мащенням. Як мастильні матеріали використовують мінеральні та синтетичні оливи, консистентні мастила, покриття м'якими металами (міддю, кадмію) та покриття на основі твердих мастильних матеріалів графіту, дисульфиду молібдену, антифрикційні полімерні покриття тощо.

Залежно від умов утворення і властивостей прошарку мастильного матеріалу в трибоспряженні розрізняють рідинне, граничне тертя і тертя поверхонь, змащених твердими мастильними матеріалами. Як проміжні види тертя за наявності мастильного матеріалу інколи виділяють напіврідинне і напівграничне тертя.

Режим рідинного (гідродинамічного) тертя характеризується тим, що поверхні деталей повністю розділяються в результаті тиску, що самовільно виникає в прошарку рідкого мастильного матеріалу за наявності відносного переміщення поверхонь. Тиск мастильного матеріалу в зазорі зрівноважує силу зовнішнього навантаження, забезпечує рівномірність розподілу напружень у поверхневому шарі матеріалу деталей. Опір відносному переміщенню деталей трибоспряжень за такого режиму тертя визначається внутрішнім тертям у рідкому прошарку мастила. Коефіцієнт тертя і інтенсивність зношування в умовах рідинного тертя мінімальні, тому цей вид тертя щодо енергетичних втрат і довговічності деталей вважається найдосконалішим режимом роботи вузлів тертя. Напіврідинне тертя виникає, коли режим рідинного тертя відбувається частково.

В авіаційних трибосистемах рідинне тертя реалізується в підшипникових вузлах шатунно-поршневої групи поршневих двигунів, підшипникових вузлах роторів ГТД та в деяких високооборотних вузлах агрегатів, але лише на сталих режимах їх роботи. Найбільш характерним для вузлів тертя авіаційних трибосистем, які працюють в умовах мащення, є граничне тертя.

В умовах граничного тертя прошарок, що розділяє поверхні тертя, формується за рахунок адсорбції на поверхні деталей активних молекул мастильного матеріалу. Межова плівка мастильного матеріалу може мати досить велику несучу здатність, що забезпечує ефективний захист від молекулярної взаємодії матеріалів пари тертя. Важливим фактором, що сприяє підвищенню зносостійкості в умовах граничного тертя, є здатність мастильного матеріалу сприяти формуванню на поверхні металу захисних плівок, як правило, оксидних, фосфідних та сульфідних. Наявність на поверхні деталей ефективної граничної плівки мастила може в декілька разів знизити коефіцієнт тертя і в сотні разів знизити інтенсивність зношування. Порушення цілісності межового прошарку мастильного матеріалу, наприклад у результаті надмірного збільшення тиску або під дією абразивних частинок, може викликати перехід до режиму напівграничного тертя.

Тертя поверхонь, змащених твердими мастильними матеріалами застосовують у випадках, коли умови роботи вузла тертя або його конструктивне виконання не дозволяють використовувати рідкі і консистентні мастильні матеріали або реалізувати ефективний режим рідинного або граничного мащення. До таких трибосистем, наприклад, належать важконавантажені вузли, вузли, що працюють за низьких швидкостей ковзання, коли несуча здатність рідкого або межового прошарку мастильного матеріалу може бути недостатньою.

Тверді мастильні матеріали застосовують під час роботи в умовах високих і низьких температур, коли звичайні мастильні матеріали під дією температури відповідно розкладаються і замерзають, а також під час роботи в агресивних середовищах, вакуумі, дії радіації та ряді інших специфічних умов роботи трибоспрямижень.

До твердих мастильних матеріалів належать речовини, що наносяться на поверхню деталей і мають зсувну міцність, значно нижчу ніж матеріалу деталі. Такі речовини, будучи нанесеними на поверхню деталей у вигляді тонких плівок або тонких покриттів, забезпечують додатний градієнт зсувної міцності у напрямку внутрішньої нормалі до межі твердої поверхні ($dt/dh > 0$). Як тверді мастильні матеріали використовують: шарувато-гранчасті речовини пластинчастої структури з різкою анізотропією міцності між шарами атомів у кристалічній ґратці, тонкі плівки м'яких металів і оксидів металів,

плівки хімічних з'єднань, які утворюються на поверхні металів шляхом оброблення їх активними реагентами, що містять хлор, фосфор, азот, сірку, плівки і покриття на основі полімерів тощо.

В авіаційних трибосистемах найбільшого поширення набули твердомастильні покриття на основі графіту, дисульфиду молібдену, фторопласту, які отримують із суспензій, та електролітичні покриття м'якими металами – сріблом, кадмієм, міддю.

Суспензії у складі графіту, дисульфиду молібдену, фторопласту або їх комбінацій у певному поєднанні зв'язуючого та розчинника наносять розпиленням стисненим повітрям, кісточкою чи зануренням деталі з наступним сушінням і твердінням. Такі технології застосовують для нанесення покриттів з метою запобігання схопленню і забезпечення надійного змащення з'єднань з гарантованим натягом, а також для просочування пористих газотермічних покриттів для зниження коефіцієнта тертя. Як зв'язуючі компоненти використовують органічні смоли і неорганічні матеріали – селікат натрію, фосфати і борати металів.

Для таких же цілей, що і твердомастильні покриття на основі твердомастильних матеріалів із зв'язуючим, використовуються покриття із м'яких металів. У процесі ремонту АТ усі закладені в конструкції вузлів і з'єднань твердомастильні покриття підлягають відновленню.

5.2. Загальні уявлення про механізм зовнішнього тертя та зношування металів

У загальному розумінні поняття зовнішнього тертя розглядається як явище опору відносному переміщенню, що виникає між двома тілами в зонах дотику їх поверхонь по дотичних до них і супроводжується дисипацією енергії.

Дисипативність процесу тертя характеризується перетворенням зовнішньої роботи, що здійснюється силами тертя, у теплову, хімічну, електричну та деякі інші види енергії. Частина цієї роботи витрачається на збільшення внутрішньої енергії поверхневого шару матеріалів трибопари.

Згідно з уявленнями молекулярно-механічної теорії тертя [23; 24], яка натепер є найбільш теоретично і експериментально обґрунтованою, сила тертя подається як сума молекулярної (адгезійної) і механічної (деформаційної) складових:

$$F_{\text{тер}} = F_a + F_d.$$

Молекулярна складова (F_a) зумовлена опором розриву при зсуві молекулярних або міжатомних зв'язків, які виникають між контактними поверхнями тіл. Це явище властиве всім без винятку твердим тілам і зумовлено наявністю на їх поверхні атомів з ненасиченими зв'язками. Механізм руйнування адгезійних зв'язків для кристалічних тіл таких, як метали розглядається як механізм, аналогічний руйнуванню кристалічної ґратки при зсуві.

Взаємодія газів та рідин з поверхнями твердих тіл у процесі тертя формує «третє тіло», що істотно змінює молекулярну складову сили тертя. Ця взаємодія може мати характер або фізичної адсорбції, або хімічної адсорбції.

Механічна складова F_d викликана опором пружному і пластичному відтисненню матеріалу при взаємному або односторонньому впровадженні мікронерівностей поверхонь тіл у процесі їх відносного переміщення.

Наслідком і зовнішнім проявом тертя твердих тіл є їх поверхневе руйнування та зношування. В умовах тертя металів зношування супроводжується утворенням дефектів кристалічної ґратки, фазовими і структурними перетвореннями, окисненням, корозією та іншими фізико-хімічними процесами. У зв'язку з цим, а також з огляду на специфіку схеми напружено-деформованого стану поверхневого шару, що формується під дією сил тертя, спроби описати поверхневе руйнування лише з використанням уявлень об'ємної міцності не мають достатньої правомірності [25; 26].

Одним із найбільш важливих положень що лежать в основі уявлень про тертя та зношування, є врахування дискретності контакту реальних поверхонь твердих тіл [23; 24].

Згідно з цим положенням, силова взаємодія між поверхнями тіл, що піддаються тертю, здійснюється на плямах фактичного контакту і реалізується шляхом утворення та руйнування фрикційних зв'язків. Залежно від характеру взаємодії поверхонь розрізняють п'ять основних видів фрикційних зв'язків: пружне відтиснення матеріалу, пластичне відтиснення матеріалу, мікрорізання, адгезійне руйнування і когезійний відрив.

За умови моделювання мікровиступів шорсткості поверхні у вигляді жорсткого сферичного виступу вид фрикційного зв'язку визначається відношенням глибини впровадження h мікровиступу

поверхні одного тіла в інше до радіуса кривизни виступу R , а також градієнтом механічних властивостей $d\tau/dh$, що характеризує різницю міцності (опору зсуву) адгезійного зв'язку і міцності розміщених нижче від приповерхневих шарів матеріалів контактної пари.

Пружне відтиснення відбувається за співвідношення $h/R < 0,01$, коли напруження в зоні фрикційного контакту не перевищують границю текучості матеріалу. За такого виду контактної взаємодії зношування перебігає за механізмом багатоциклової фрикційної втоми.

Пластичне відтиснення проявляється за умови $h/R < 0,1$, коли контактні напруження більші або дорівнюють границі текучості матеріалу, але за відносного зміщення тіл матеріал поверхневого шару не руйнує, а обтікає впроваджені мікрОВиступи контртіла. Такому виду контактної взаємодії відповідає зношування, яке відбувається за механізмом малоциклової фрикційної втоми.

Умовою проходження мікрорізання є співвідношення $h/R < 0,1$ для незмашених поверхонь і $h/R > 0,2 \dots 0,3$ за наявності мастила. За таких умов контактні напруження перевищують границю міцності матеріалу, порушується режим обтікання мікрОВиступів деформованим поверхневим шаром і руйнування відбувається уже при перших актах взаємодії. Мікрорізання потребує великих тисків для глибокого впровадження одиничних мікрОВиступів у поверхню контртіла і за нормальних умов роботи спржень практично не відбувається.

Адгезійне руйнування відбувається як результат утворення і зрізання осередків адгезійних зв'язків безпосередньо за місцем їх утворення і реалізується, коли міцність адгезійних зв'язків нижча за міцність матеріалів контактної пари, тобто за умови $d\tau/dh > 0$.

У випадку когезійного відриву здійснюється схоплення поверхонь, яке супроводжується глибинним «відриванням» матеріалу менш міцної поверхні ($d\tau/dh < 0$).

Реалізація того чи іншого виду фрикційних зв'язків та відповідного механізму зношування залежить від природи матеріалів контактної пари, геометрії контакту, виду та режимів тертя, параметрів фрикційно-контактного навантаження та багатьох інших

факторів, які визначають як сам процес тертя, так і формування властивостей поверхневого шару.

На основі положення про дискретність контакту і циклічний пружно-пластичний характер деформування поверхневих шарів, який найбільше відповідає реальним умовам роботи пар тертя, В. І. Крагельським розроблено теорію втомного зношування. Згідно з цією теорією у процесі тертя відбувається багаторазове знакозмінне деформування мікрооб'ємів поверхневого шару більш м'якого матеріалу впровадженими твердими виступами мікронерівностей контртіла. У разі вичерпування матеріалом у локальних мікрооб'ємах запасу міцності утворюються мікротріщини, розвиток яких призводить до відокремлення частинок зносу.

Теорія втомного зношування знайшла підтвердження в багатьох дослідженнях, що проводились на різних матеріалах та в різних умовах тертя. На її основі отримано аналітичні залежності для визначення інтенсивності зношування для випадків пружного і пластичного контактів. Детально ці питання розглянуто у праці [27].

З урахуванням окиснювальних процесів, які зазвичай завжди відбуваються в умовах тертя металів у середовищі повітря, та процесів утворення поверхневих плівок хімічних сполук при фрикційно-контактній взаємодії металів у середовищі мастильних матеріалів Б. І. Костецьким із співробітниками висунуто концепцію структурної пристосованості матеріалів і саморегулювання процесів тертя та зношування [25]. Головна ідея, що покладена в основу механізму структурної пристосованості, полягає в такому: під час тертя під дією пружно-пластичної деформації поверхневий шар матеріалу змінює свою структуру і переходить у термодинамічно нестійкий активний стан. У результаті структурної і термічної активності утворюється нова фаза – вторинні структури.

Автори [25] виділяють нормальні (допустимі) процеси зношування і недопустимі процеси – пошкоджувальність. При нормальному зношуванні об'єктом поверхневого руйнування є вторинні структури. Між руйнуванням і відновленням (регенерацією) вторинних структур існує динамічна рівновага, яка є необхідною умовою нормального режиму тертя та зношування матеріалів трибосистеми. Порушення такої рівноваги в напрямі переважного розвитку процесу руйнування вторинних структур призводить до

виникнення явищ пошкоджуваності, до яких згідно із запропонованою у працях [25; 28] класифікацією належать схоплення першого і другого роду, абразивне стирання, фреттинг-процес, утомний пітинг при коченні та деякі інші види зношування.

У результаті комплексних досліджень було встановлено, що вторинні структури, що утворюються на металах за нормальних процесів тертя та зношування, являють собою однофазні або гетерофазні тонкоплівкові об'єкти, що мають ультрадисперсну, орієнтовану будову та, як правило, є пересиченими твердими розчинами (вторинні структури першого роду) або хімічними сполуками металів (вторинні структури другого роду) з активними компонентами середовища (пасиваторами) – киснем, азотом, сіркою, фосфором, хлором та ін. Загальною властивістю вторинних структур першого та другого роду є їх здатність мінімізувати процеси руйнування поверхневих шарів металів, запобігати розвитку схоплення, втоми, корозії та інших деструктивних процесів, що спричиняють інтенсивне зношування. На підставі аналізу кінетики і механізмів утворення та руйнування вторинних структур розроблено принципи структурної пристосованості і принципи керування поверхневою міцністю матеріалів трибосистеми [25].

Спільним у підходах авторів теорії структурної пристосованості і теорії втомного зношування до процесу поверхневого руйнування матеріалів в умовах тертя є те, що утворення вторинних структур не виключає можливості їх втомного руйнування.

Поверхневі плівки, у тому числі оксидні, не запобігають деформаційним процесом, а лише вносять специфіку у її розвиток [25; 26]. Специфіка полягає у тому, що деформуванню і руйнуванню піддаються поверхневі шари з істотно іншим, ніж матеріал основи, властивостями. При цьому природа фрикційної втоми поверхневих шарів за своєю суттю має не стільки якісні, скільки кількісні відмінності від природи об'ємної втоми металів [25].

Руйнування плівок вторинних структур в умовах тертя розглядається як процес поступового зростання між матеріалом основи і новою фазою (вторинною структурою) різного роду невідповідностей, таких, як хімічний склад, структура, параметри кристалічної ґратки, щільність, поверхнева енергія тощо. За циклічного навантаження, зумовленого актами взаємодії мікронерівностей, на межі поділу фаз приповерхневих шарів металу і утвореної в результаті зазначеної трансформації поверхневої структури нагромаджують-

ся дефекти та концентруються внутрішні напруження, що викликає виникнення підповерхневих тріщин. Їх злиття і розвинення магістральних тріщин до поверхні обумовлює акт руйнування мікрооб'ємів поверхні і утворення частинок зносу. Такий механізм поверхневого руйнування і зношування розглядається, зокрема, у концепції зношування відшаруванням [29].

Зазвичай в умовах «легких» режимів тертя і нормального механоокиснювального зношування процес руйнування локалізується в тонкому поверхневому шарі і розвивається внаслідок або руйнування адгезійних зв'язків [30; 31], або відшарування плівок поверхневого шару, насамперед плівок вторинних структур [25; 29], при нагромадженні на межі поділу фаз критичної величини напружень. Масштаби руйнування поверхонь трибоконтакту за таких умов, як правило, незначні, а інтенсивність зношування мінімальна.

За «важких» режимів тертя, коли фрикційна взаємодія поверхонь трибоконтакту здійснюється, наприклад, за високих контактних напружень, процесом руйнування охоплюються значні обсяги прилеглих до поверхні шарів матеріалу і відповідно збільшуються масштаби руйнування. Такий режим відповідає недопустимим умовам роботи трибопари, а параметри стану трибосистеми, за яких відбувається перехід від одного масштабу руйнування поверхонь в умовах тертя до іншого, називають критичними точками.

Останнім часом дедалі більшого поширення набувають дослідження процесів тертя та зношування твердих тіл, які ґрунтуються на енергетичних підходах та підходах термодинаміки незворотних процесів відкритих систем [32–35]. Згідно з уявленнями сучасної фізики міцності руйнування матеріалів можна розглядати як заключну фазу складного багатоетапного процесу нагромадження пошкоджувальності, що закономірно розвивається на атомарному, нано- та мезоскопічному рівнях [36; 37]. Саме перебіг фундаментальних термофлуктуаційних процесів на вказаних рівнях організації матерії зумовлює незворотні зміни структури кристалів задовго до появи зовнішнього прояву їх руйнування – утворення тріщин, частинок зносу і т. ін. Дискретний процес нагромадження пошкоджень кристалічної ґратки на макрорівні проявляється як непереривний процес збільшення внутрішньої енергії деформованої тертям поверхні кристала [33].

У працях В. В.Федорова [32] показано, що з часом внутрішня енергія кристала під дією зовнішніх механічних навантажень у парах тертя зростає за законом, близьким до лінійного. Із досягненням деякого критичного значення внутрішньої енергії відбувається руйнування матеріалу. Розглядаючи фізично не скінченно малий об'єм твердого тіла, який зазнає руйнування, як відкриту термодинамічну систему, що перебуває за установлених зовнішніх умов у стані локальної термодинамічної рівноваги, умову руйнування матеріалу можна подати у вигляді

$$\Delta Q = Q_0,$$

де ΔQ та Q_0 , – відповідно зміна внутрішньої енергії системи та її молярна енергія активації руйнування.

Величина Q_0 залежить від енергоємності матеріалу і є фундаментальною енергетичною характеристикою його міцності; ΔQ відображає нагромаджену матеріалом у процесі тертя внутрішню енергію. У випадку досягнення нагромадженню внутрішньої енергією значення, що дорівнює Q_0 , відбувається акт руйнування мікрооб'єму матеріалу.

У загальному випадку внутрішня енергія системи змінюється внаслідок комплексного впливу різноманітних термодинамічних процесів – теплових, механічних, хімічних, дифузійних, електромагнітних та інших і описується фундаментальним рівнянням Гіббса [38]:

$$\Delta Q = T\Delta S - P\Delta V + \sum \mu_i \Delta U_i,$$

де T – абсолютна температура, P – тиск, V – об'єм, S – ентропія, μ_i – хімічний потенціал i -го компонента, молярна частка якого у системі дорівнює U_i .

Із позиції уявлення про реологію в'язкопружного фрикційного контакту механізми, що відповідають за нагромадження матеріалами пари тертя внутрішньої енергії і дисипацію (розсіювання) підведеної до трибосистеми зовнішньої механічної енергії, розглядаються в термінах внутрішнього тертя [22; 39]. Як зазначають автори такого підходу, за динамічного, циклічного характеру навантажень, характерних для зон дискретного фрикційного контакту, дисипативні процеси супроводжуються зміною (нагромадженням) внутрішньої енергії трибосистеми, а більша частка підведеної механічної енергії розсіюється у формі тепла за меха-

нізмами внутрішнього тертя [40]. Реологічні властивості фрикційного контакту визначають діючі механізми і рівень внутрішнього тертя та зумовлюють вирішальний вплив на формування напружено-деформованого стану поверхневих шарів металу і в кінцевому підсумку на зносостійкість трибоспрямижень [34].

Узагальнюючи різні підходи до фізичної природи процесів зовнішнього тертя і зношування металів, можна стверджувати, що основною причиною руйнування матеріалів в умовах тертя є пружно-пластична деформація поверхневих шарів у фрикційному контакті. Саме вона обумовлює як кінетику трансформації структури поверхневого шару, так і кінетику нагромадження різного роду руйнівних пошкоджень. Сам процес зношування необхідно розглядати як кумулятивний стахостичний процес деградації елементів трибосистем, що складається із великої кількості мікро-скопічних актів руйнування окремих поверхневих мікрооб'ємів матеріалів пари тертя.

5.3. Основні види зношування деталей авіаційних трибосистем

Конструкція сучасних ПС і АД являє собою складну багатофункціональну систему взаємопов'язаних конструктивних елементів, вузлів і механізмів з великою кількістю рухомих і номінально нерухомих з'єднань, деталі яких під час експлуатації зазнають тертя і зношування. Так, лише у комплексі шасі літака Ан-124 кількість рухомих з'єднань перевищує 390 [41], а загальна кількість вузлів тертя широкофюзеляжного літака з урахуванням потенційної можливості малих відносних переміщень у всіх з'єднаннях може визначатись 6–7-значним числом. Попри значний прогрес і досягнення у технології літако- і авіабудуванні, знос і пошкодження деталей у вузлах тертя і трибоспрямиженнях продовжує залишатись одним з основних факторів, що знижують експлуатаційну надійність і обмежують ресурс АТ [17; 42].

У загальному випадку знос розглядається як один із проявів поверхневого руйнування деталей, що відбувається під дією сил тертя. У цьому розумінні термін «поверхнєве руйнування» означає не стільки переважну локалізацію руйнування в поверхневому шарі деталі, скільки те, що в основі такого руйнування лежать механізми контактної взаємодії поверхонь елементів трибоспрямижень.

До поверхневого руйнування деталей можуть також призводити корозійні процеси, електрична ерозія, дефекти хіміко-термічного оброблення тощо. Але відмінною ознакою, що відрізняє знос від корозії та деяких інших процесів поверхневого руйнування, є наявність силового впливу на поверхню деталі.

Зовнішній силовий вплив у процесі тертя може здійснюватися декількома способами. Найбільш поширеним у авіаційних трибосистемах є безпосередня фрикційно-контактна взаємодія поверхонь деталей під час їх відносного переміщення. На поверхню деталей можуть діяти також потоки газів або рідин окремо, або в їх поєднанні з дією твердих абразивних частинок. Незалежно від характеру силового впливу за певних умов контактного навантаження і робочого середовища поверхневий шар матеріалу деталей поступово руйнується. Процес поверхневого руйнування елементів трибоспряджень, який супроводжується зміною розмірів, форми та стану поверхонь деталей унаслідок тертя, називають зношуванням.

Різноманітність поєднання матеріалів пар тертя, різні характер і рівень діючих контактних та об'ємних навантажень, температур, фізико-хімічних властивостей робочих середовищ та інших умов роботи деталей різних вузлів, конструктивних елементів, систем і агрегатів ПС і АД призводять до різних трибологічних процесів, що зумовлюють розвинення їх поверхневого руйнування і вид зношування. На основі узагальнення досвіду експлуатації і ремонту АТ у табл. 5.1 наведено найбільш характерні види контактної взаємодії і види зношування деталей в авіаційних трибосистемах [20; 43].

Допустимим і найбільш сприятливим щодо забезпечення тривалої працездатності деталей вузлів тертя є окиснювальне зношування. Такий вид зношування являє собою безперервний процес утворення і руйнування в умовах тертя хімічно адсорбованих плівок, плівок твердих розчинів і хімічних сполук металів з киснем. Окиснювальне зношування виникає під час тертя ковзання і тертя кочення в умовах відсутності в зоні контакту мастильного матеріалу або реалізації граничного та рідинного тертя. Окиснювальному зношуванню підлягають багато деталей вузлів тертя ПС і АД. За незначного темпу зношування в кожному конкретному випадку на таких деталях формується оптимальна за триботехнічними властивостями поверхня, що забезпечує високу зносостійкість і строк служби таких деталей.

Зношування при схопленні виникає внаслідок утворення між поверхнями деталей металевих зв'язків, глибинного виривання матеріалу, перенесення його з однієї поверхні тертя на іншу і дії утворених нерівностей на поверхню спряженої деталі. Розрізняють два види схоплення [28]: схоплення першого роду і схоплення другого роду.

При схопленні першого роду металеві зв'язки утворюються в результаті інтенсивної пластичної деформації поверхневих об'ємів металу, яка зумовлена атермічною пластичністю. Такий вид зношування виникає в умовах тертя ковзання з малими швидкостями відносного переміщення і за питомих контактних навантажень, що перевищують границю текучості матеріалу на плямах фактичного контакту.

Таблиця 5.1

**Характер контактної взаємодії і види зношування
деталей авіаційних трибосистем**

№ з/п	Вузол тертя, деталь	Характер контактної взаємодії, що зумовлює зношування	Вид зношування
1	Деталі пресованих з'єднань	Вібраційні мікропереміщення контактних поверхонь. Тертя без мастильного матеріалу, інколи граничне тертя	Зношування при фретинг-корозії. Схоплення матеріалів. Перенесення матеріалів при схопленні
2	Елементи болтових і заклепкових з'єднань	Вібраційні мікропереміщення елементів з'єднань. Тертя без мастильного матеріалу	Багаторазове передформування плям контакту. Зношування унаслідок фретинг-корозії. Схоплення металів. Перенесення металів при схопленні
3	Шліцьові з'єднання	Зворотно-поступальний рух. Мікропроковзування контактних поверхонь. Граничне тертя	Зминання матеріалу. Окиснювальне та втомно-окиснювальне зношування. Зношування унаслідок фретинг-корозії. Абразивне зношування. Схоплення металів

Продовження табл. 5.1

№ з/п	Вузол тертя, деталь	Характер контактної взаємодії, що зумовлює зношування	Вид зношування
4	Шарнірно-болтові з'єднання. Шарніри зі сферичними опорами	Зворотно-обертовий рух при ковзанні в обмежених за кутом повороту межах. Граничне тертя з малими швидкостями	Окиснювальне зношування. Абразивне зношування. Зношування при схопленні. Фретинг-корозія
5	Підшипники ковзання	Обертовий або зворотно-обертовий рух при терті ковзання. Граничне та інколи рідинне (гідродинамічне) тертя. Локальні порушення межової плівки	Окиснювальне зношування. Абразивне зношування. Утомне зношування антифрикційного шару. Зношування при схопленні з перенесенням матеріалу. Інколи вибіркове перенесення. Задир. Заїдання.
6	Підшипники кочення	Обертовий або зворотно-обертовий рух при коченні з проковзуванням тіл кочення. Циклічний характер діючих контактних напружень. Граничне тертя, інколи рідинне тертя	Окиснювальне зношування. Абразивне зношування. Утомне зношування. Зношування при схопленні. Місцевий знос типу «несправжнього бренелювання» за вібраційного відносного мікропереміщення
7	Зубчасті передачі	Тертя кочення з проковзуванням. Циклічний характер контактних напружень. Граничне тертя. Інколи рідинне тертя	Окиснювальне зношування. Утомне зношування з викришуванням і відшаруванням матеріалу. Задир. Заїдання

Продовження табл. 5.1

№ з/п	Вузол тертя, деталь	Характер контактної взаємодії, що зумовлює зношування	Вид зношування
8	Кулькові гвинтові механізми	Зворотно-поступальний рух. Тертя кочення з проковзуванням. Граничне тертя. Інколи тертя без мастильного матеріалу	Окиснювальне зношування. Абразивне зношування. Утомне зношування
9	Гвинтові пари	Зворотно-поступальний рух. Тертя ковзання. Граничне тертя	Окиснювальне зношування. Абразивне зношування. Схоплення. Заїдання
10	Золотникові пари	Зворотно-поступальний рух спільно з вібраційними мікропереміщеннями, а також за одночасного обертового руху. Змащення робочою рідиною. Інколи тертя без змащення	Окиснювальне зношування. Мікро- і макросхоплення. Задир. Заїдання. Облітерація зазору в парі
11	Вузли тертя циліндр-поршень, букса-циліндр	Зворотно-поступальний рух. Тертя ковзання. Граничне тертя	Окиснювальне зношування. Абразивне зношування. Схоплення матеріалів. Задир. Заїдання
12	Замкові з'єднання лопаток компресора, турбін ГТД та інші подібні номінально-нерухомі з'єднання	Вібраційні мікропереміщення контактних поверхонь. Тертя без змащення або тертя поверхонь змащених твердими мастильними матеріалами	Багаторазове передерформування плям контакту. Зношування унаслідок фретинг-корозії

Закінчення табл. 5.1

№ з/п	Вузол тертя, деталь	Характер контактної взаємодії, що зумовлює зношування	Вид зношування
13	Деталі повітряного тракту ГТД, передні кромки оперення літаків, несучі гвинти гелікоптерів	Ударна дія твердих частинок, що містяться в набіглому потоці повітря	Газоабразивне зношування. Мікрорізання матеріалу. Утворення подряпин
14	Лопатки турбін ГТД, клапани і клапанні сидла поршневих двигунів	Дія високошвидкісного потоку гарячих газів, що містять корозійно-активні компоненти і абразивні частинки	Ерозійне зношування. Газоабразивне зношування
15	Деталі клапанних пристроїв та інші деталі паливних і гідравлічних систем	Дія високошвидкісного потоку рідини, що містить корозійно-активні компоненти і абразивні частинки	Кавітаційне зношування. Гідроабразивне зношування

При схопленні другого роду утворення металевих зв'язків зумовлено нагріванням, розм'ягченням, деформуванням поверхонь контакту вільних від плівок будь-яких вторинних структур. Схоплення другого роду виникає в умовах тертя ковзання з великими швидкостями відносного переміщення, або високих робочих температур деталей.

Утомне зношування є результатом повторного передеформування поверхневих мікрооб'ємів металу, що призводить до виникнення мікротріщин і відокремлення частинок зносу. Швидкість процесів, що зумовлюють явище фрикційної втоми металів за такого виду зношування перевищує швидкість інших процесів, які перебігають на поверхнях тертя. Утомне зношування спостерігається у підшипниках кочення, зубчастих передачах, на деталях різних розподільних пристроїв і в багатьох інших парах, де відбувається тертя кочення, тертя кочення з проковзуванням і тертя ковзання за значних контактних навантажень і може поєднуватися

з окиснювальними і корозійними процесами. Розвитку втомного зношування сприяють залишкові напруження першого роду, які можуть утворитись за механічного або інших видів оброблення поверхні деталей.

Абразивне зношування деталей авіаційних трибосистем, як правило, викликано потраплянням абразивних речовин або інших твердих частинок у зону тертя. Форми і механізми руйнування поверхонь деталей за цього виду зношування визначаються взаємодією поверхонь тертя з абразивним середовищем, яке полягає в ковзанні твердих абразивних частинок, упровадженні їх у поверхневий шар металу, деформуванні та руйнуванні поверхневих об'ємів без різання металу або зі зняттям мікростружки. Під дією абразивних частинок можуть руйнуватися шари мастильного матеріалу і захисних плівок вторинних структур. Тому потрапляння в зону тертя абразиву, крім абразивного зношування, може викликати схоплення. Такий процес, наприклад, спостерігається у плунжерних парах агрегатів паливної системи.

Найбільш характерним видом зношування за участю абразивного середовища для деталей авіаційних конструкцій є газоабразивне зношування в потоці повітря і потоці продуктів згоряння палива.

Ефективним способом боротьби з абразивним зношуванням усіх видів є підвищення твердості та поліпшення якості оброблення поверхонь деталей. Для попередження потрапляння абразивних речовин у зону тертя в конструкції вузлів, мастильних і паливних системах передбачаються спеціальні ущільнювальні пристрої, а також фільтри для очищення мастильних матеріалів і палива від продуктів зношування та механічних домішок. За допомогою зазначених заходів значною мірою вдається уникнути абразивного зношування деталей. Разом з цим боротьба з газоабразивним зношуванням ряду деталей і елементів конструкцій ПС і АД натеper залишається складним завданням.

Одним із найбільш складних для передбачення виникнення як в авіаційних конструкціях, так і в конструкціях інших машин видів зношування є фретинг-корозія. Такий вид зношування характерний для деталей номінально-нерухомих з'єднань, що працюють в умовах циклічного та вібраційного навантаження. На поверхнях, пошкоджених фретинг-корозією, можуть одночасно

перебігати схоплення, втомно-окиснювальні, корозійно-втомні процеси, абразивне зношування.

Схоплення як провідний процес фретинг-корозії, відбувається у пресових, болтових, заклепкових та інших з'єднаннях, у яких унаслідок дії значних контактних навантажень ускладнюється доступ у зону контакту навколишнього середовища. Абразивне зношування переважає у з'єднаннях, деталі яких виготовлені зі сплавів, що утворюють тверді продукти зношування, наприклад, Al_2O_3 . Утомно-окиснювальні і корозійно-утомні процеси розвиваються у результаті поєднання процесів фрикційної втоми з корозійними процесами, які розвиваються відповідно за механізмами хімічної та електрохімічної корозії.

Для визначення стратегії і напрямів досліджень, спрямованих на пошук ефективних способів і технологій підвищення зносостійкості та відновлення під час ремонту деталей авіаційних трибосистем, необхідно мати інформацію про масштаби, умови та причини виникнення дефектів, спричинених тертям та зношуванням.

Узагальнені дані статистичного аналізу дефектів деталей вузлів тертя АТ (табл. 5.2) містять оцінку розподілу деталей за інтенсивністю зношування, їх впливом на безпеку експлуатації АТ та впливом на економічні показники ремонту, а також розподілу деталей за видом тертя і за характером відносного переміщення, що спричиняє зношування, наявності спеціального протизношувального чи антифрикційного оброблення контактних поверхонь деталей, типу контактних поверхонь.

Аналіз виконувався на підставі даних дефектацій деталей під час ремонту за трьома типами літаків, трьома типами гелікоптерів і двома типами авіаційних ГТД. До групи деталей, що мають високу інтенсивність зношування, належать деталі, знос яких за міжремонтний строк служби перевищує допустимий або близький до нього. Група деталей, що впливають на безпеку експлуатації, містить деталі, втрата працездатності яких може стати причиною відмови найбільш відповідальних систем і агрегатів. До групи деталей, що впливають на економічні показники ремонту належать деталі, заміна яких у разі вибракування під час ремонту суттєво здорожчує вартість ремонту.

Систематизація деталей за наведеними вище ознаками дає змогу, з одного боку, визначити рівень триботехнічного забезпечення працездатності деталей вузлів тертя АТ та дослідити причинно-

наслідкові зв'язки прояву дефектів, з другого – установити ступінь впливу дефектів на показники надійності і безпеку експлуатації АТ, а також оцінити конструктивну технологічність деталей з огляду на придатність їх робочих поверхонь до застосування методів зміцнювального або антифрикційного оброблення та відновлення, зокрема шляхом нанесення захисних зносостійких покриттів, покриттів на основі твердих мастильних матеріалів тощо.

Результати статистичного аналізу, наведені в табл. 5.2, показують, що майже за всіма типами АТ переважна більшість деталей вузлів тертя, дефекти яких зумовлені тертям та зношуванням, характеризуються високою інтенсивністю зношування. Тобто за міжремонтний строк служби величина зносу перевищує або наближається до встановленого граничного допуску. При цьому знос і пошкодження у вузлах тертя для половини деталей за групами літаків та гелікоптерів і для більше ніж третьої частини деталей ГТД можуть стати причиною відмови, тобто є значущими щодо впливу на надійність і безпеку експлуатації АТ.

Половина деталей за групами літаків і гелікоптерів і більш ніж 2/3 деталей ГТД належать до категорії значущих щодо впливу на економічні показники ремонту.

Таблиця 5.2

**Результати статистичного аналізу дефектів
деталей вузлів тертя АТ**

№ з/п	Характеристика розподілу деталей	Частка пошкоджених деталей, %			Середнє значення, %
		за гру- пою літаків	за групою гелікопте- рів	за гру- пою ГТД	
1	Інтенсивність зношування	92,1	100,0	86,3	92,3
2	Вплив на безпеку експлу- атації	53,1	42,1	37,7	44,4
3	Вплив на економічні показники	48,2	47,2	69,3	54,9
4	Вид тертя за характером відносного руху, що спри- чиняє пошкодження: тертя ковзання при відносному циклічному переміщенні	64,5	51,2	87,8	67,8

Закінчення табл. 5.2

№ з/п	Характеристика розподілу деталей	Частка пошкоджених деталей, %			Середнє значення, %
		за групою літаків	за групою гелікоптерів	за групою ГТД	
	тертя ковзання при обертовому русі	11,4	14,2	8,5	11,4
	тертя ковзання при зворотно-обертовому русі	10,3	21,4	2,5	11,4
	тертя кочення	10,3	1,6	1,2	4,4
	інші	3,5	11,6	-	5,0
5	Наявність спеціального протизношувального чи антифрикційного оброблення контактної поверхні: спеціально оброблені деталі	48,3	52,1	46,1	48,8
	спеціально не оброблені деталі	51,7	47,9	53,9	51,2
6	Тип контактної поверхні, що пошкоджується: плоска	71,1	—	49,4	22,2
	циліндрична зовнішня	40,0	56,6	13,4	36,6
	циліндрична внутрішня	34,2	25,8	24,4	28,1
	шліцьова, зубчаста, різьова та інші	8,7	17,6	12,8	13,1

Для аналізу причин пошкодження деталей вузлів тертя та визначення можливості подальшого підвищення їх зносостійкості та відновлення доцільно зіставити показники розподілу деталей за характеристикою «інтенсивне зношування» з показниками розподілу, що визначають наявність протизношувального або антифрикційного оброблення контактних поверхонь, тип контактних поверхонь і вид тертя.

Розподіл деталей за зазначеними характеристиками свідчить, що в середньому за всіма типами АТ кожна друга деталь не має спеціального протизношувального чи антифрикційного оброблення, тобто технологічно не була підготовлена до роботи в умовах тертя. Відсоток деталей, які мають високу інтенсивність

зношування, в 1,2–2 рази перевищує відсоток деталей, які не були спеціально оброблені. Такий результат свідчить про те, що низькі протизношувальні властивості і пошкодження деталей вузлів тертя зумовлені не тільки тим, що контактні поверхні не були спеціально оброблені, але і недостатньою ефективністю тих методів спеціального протизношувального чи антифрикційного оброблення, що застосовувались.

Серед існуючих методів інженерії поверхні, спрямованих на підвищення експлуатаційної довговічності деталей, для підвищення зносостійкості найбільш ефективні методи нанесення зносостійких захисних покриттів. Такі покриття, як гальванічні, газотермічні, наплавлення та деякі інші дають змогу як надавати необхідні триботехнічні властивості у процесі виготовлення нових деталей, так і відновлювати зношені деталі під час ремонту. Одним із факторів, що обмежують застосування захисних покриттів, є доступність поверхні деталі для нанесення покриття і складність її геометричної форми для наступного розмірного механічного оброблення.

Аналіз даних про поділ деталей за типом контактних поверхонь показує, що більшість деталей вузлів тертя за всіма типами АТ мають сприятливу для нанесення та оброблення покриттів плоску та циліндричну зовнішню форму.

Із виділених за характером відносного руху видів тертя, в умовах яких зношуються деталі, для всіх типів АТ переважає тертя ковзання під час відносного циклічного мікропереміщення. Такому виду тертя відповідає зношування, спричинене фретинг-корозією.

Велику кількість деталей, які пошкоджуються у вузлах тертя АТ фретинг-корозією, можна пояснити тим, що цей вид зношування розвивається переважно в номінально-нерухомих і малорухомих вузлах і з'єднаннях, які під час проектування не розглядаються як вузли тертя. Об'єктивні передумови виникнення мікропереміщень у трибоконтакті і розвинення фретинг-корозії створюють циклічне і вібраційне навантаження деталей, які для більшості конструктивних елементів, систем і агрегатів літаків, гелікоптерів і ГТД є постійно діючими факторами. Крім того, фретинг-корозія має прихований, латентний період розвинення і може бути виявлена лише після певного, часом тривалого періоду напрацювання. Із цієї причини на етапі проектування та випробу-

вання АТ не завжди можна передбачити можливість розвинення фретинг-корозії і вжити відповідних заходів для захисту деталей від пошкодження.

Особливістю фретинг-корозії є те, що цей вид поверхневого руйнування ініціює не тільки інтенсивне зношування деталей, але і, будучи поєднаним з дією циклічних навантажень, може істотно знизити їх утомну міцність навіть за відносно незначних пошкоджень. У результаті дійсна втомна міцність деталі може виявитись значно нижчою, ніж розрахункова. Тому доцільно поділити дефекти, спричинені розвиненням фретинг-корозії, на дефекти фретинг-знос і дефекти фретинг-утоми. Результати такої систематизації, отримані для одного із типів авіаційних ГТД, наведено в табл. 5.3.

Таблиця 5.3

**Поділ деталей вузлів тертя одного з типів авіаційних ГТД
за видом експлуатаційних дефектів**

Вид експлуатаційного дефекту	Частка деталей, що пошкоджуються, %	
	частка з а номенклатурою	частка за кількістю деталей одного найменування
Фретинг-знос	45,2	31,5
Фретинг-утома	33,8	68,1
Інші дефекти від кон-тактної взаємодії	21,0	0,4

Визначаючи вид експлуатаційного дефекту, під фретинг-зносом розуміють будь-яку зміну топографії поверхні деталі за наявності об'єктивних передумов розвинення фретинг-корозії без передумов для виникнення втомного руйнування. Термін «фретинг-втома» відображає характер дефекту, коли в результаті спільної дії фретинг-корозії і циклічного навантаження можливе втомне руйнування деталі.

Як видно із даних, наведених у табл. 5.3, з урахуванням загальної кількості деталей одного найменування, які пошкоджуються фретинг-корозією, на частку деталей, що працюють в умовах фретинг-утоми, припадає більше ніж 2/3. Ураховуючи подібність для авіаційних ГТД конструктивно-технологічних рішень виконання багатьох деталей, вузлів і з'єднань, а також умов їх вібра-

ційного та циклічного навантаження, можна константувати, що в більшості випадків пошкодження фретинг-корозією у процесі експлуатації ГТД є потенційною причиною виникнення відмови. Передумови для фретинг-втомного руйнування є об'єктивно існуючим фактором для всіх типів АТ. Ознаки розвинення фретинг-втоми притаманні всім вузлам і з'єднанням, деталі яких зазнають одночасної дії віброконтактних і об'ємних циклічних навантажень.

5.4. Особливості зношування металів в умовах тертя кочення

У конструкціях сучасних ПС і АД широко використовують різноманітні вузли, деталі яких працюють в умовах тертя кочення. Такому виду контактної взаємодії піддаються біжучі доріжки і тіла кочення кулькових та роликових підшипників кочення, гвинтових кулькових механізмів системи механізації крила та піднімальних механізмів літаків, біжучі доріжки сателітів, осей сателітів і тіла кочення планетарних механізмів редукторів турбогвинтових двигунів тощо.

Робота деталей вузлів тертя кочення характеризується високими контактними напруженнями. Переміщення тіл кочення по спряженій поверхні в реальних умовах супроводжується проковзуванням. У підшипниках кочення проковзування виникає унаслідок різниці діаметрів тіл кочення в різних точках їх дотику з поверхнею канавки кілця, різниці діаметрів верхнього і нижнього кілець підшипника. Причиною проковзування може бути також пружна деформація тіл кочення і поверхні спряженої деталі в зоні їх дотику при переході тіла кочення із ненавантаженої зони в навантажену, а також похибки форми і розмірів тіл кочення та спряженої поверхні.

У нормальних режимах експлуатації за умов виключення контактних і теплових перенавантажень, порушення установленого режиму мащення, потрапляння в зону тертя абразивного середовища, вологи та деяких інших негативних факторів впливу вузли тертя кочення працюють в умовах нормального механоокиснювального зношування, що забезпечує їм досить високу зносостійкість і довговічність. Разом з цим на поверхнях деталей вузлів тертя кочення можуть виникати інші види поверхневого руйнування,

зокрема такі, як розтріскування, відшарування поверхневого шару, схоплення, втомне і абразивне зношування.

Найбільш пошкоджувальним і небезпечним видом руйнування контактних поверхонь деталей у вузлах тертя кочення є втомне зношування, яке отримало назву віспоподібного зношування [44]. Механізм віспоподібного зношування визначається складним напруженим станом приповерхневих об'ємів металу, що виникає в умовах тертя кочення, і особливими явищами втоми, які супроводжуються утворенням мікро- і макроскопічних тріщин з наступним відокремленням від поверхонь у процесі їх розвитку та злиття частинок металу. Такі умови створюються унаслідок багаторазового повторного передеформування приповерхневих об'ємів металу при перекочуванні тіла кочення по спряженій поверхні. При цьому кожна напружена точка поблизу поверхонь дотику зазнає дії повторно-змінних навантажень від дотичних напружень та від внутрішніх напружень, що виникають від деформаційного зміцнення поверхневих шарів.

На відміну від звичайної об'ємної втоми металів межі контактної втомної міцності не існує. Тобто вважається, що права гілка кривої контактної втоми зі зменшенням контактного напруження безперервно знижується. Основним причинами розвитку контактної втоми і віспоподібного зношування металів в умовах тертя кочення є напруження стиску і зсуву, що виникають за одночасного кочення і проковзування, а також залишкові напруження першого роду, що виникають в результаті пластичного деформування приповерхневих об'ємів металу [44]. Виникнення напружень першого роду пов'язують із збільшенням об'єму пластично деформованих шарів металу за умов обмеження його з боку недеформованих розміщених нижче шарів. Величина залишкових напружень пропорційна об'єму пластично деформованого металу і може досягати досить великих значень.

Залежно від співвідношення нормальної і тангенсiальної складових сил тертя у контактi, а також від характеру зміни фізико-механічних властивостей в приповерхневому шарі металу первинна мікротріщина контактної втоми може зароджуватись на поверхні або в підповерхневому шарі на деякій відстані від поверхні. У першому випадку початкова тріщина, що зародилася на поверхні, розвивається під невеликим кутом ($< 45^\circ$) до поверхні в напрямку кочення і знову виходить на поверхню. У результаті повторного виходу трі-

щини на поверхню відокремлюється певний об'єм поверхневого шару металу з утворенням виразкового (віспоподібного) пошкодження. Глибина викришеного шару металу приблизно відповідає глибині, на якій діють максимальні дотичні напруження [20].

Підповерхневі початкові тріщини від контактної втоми спостерігаються переважно у важконавантажених вузлах тертя кочення або на деталях, що піддаються тертю кочення і мають неоднорідну структуру поверхневого шару – азотованих, цементованих, поверхнево-загартованих. Із подальшим розвиненням підповерхневі тріщини виходять на поверхню тертя, що призводить до відокремлення металу.

Характер пошкодження від контактної втоми, що виникають на поверхні деталей вузлів тертя кочення, на прикладі гвинта одного із кульково-гвинтових механізмів літака показано на рис. 5.4.

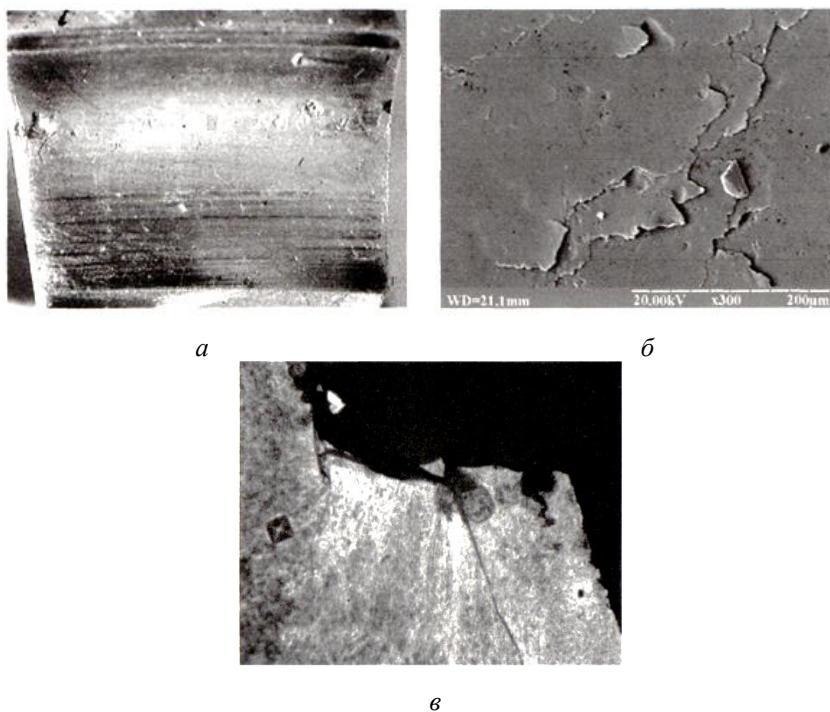


Рис. 5.4. Характер зносу поверхні (а, б) і розвиток тріщин у зоні пошкодження (в) жолоба гвинта кульково-гвинтового механізму

Істотну роль у розвитку зношування від контактної втоми у вузлах тертя кочення відіграє вид мащення і властивості мастильного матеріалу.

Мастильний матеріал у разі потраплення у тріщину, що розвивається від поверхні у глибину металу, під дією зовнішнього навантаження чинить розклинювальну дію. Тиск мастильного матеріалу на стінки тріщин біля її вершини може досягати високих значень, що спричиняє пришвидшений ріст тріщин, а отже, і процесу поверхневого руйнування металу.

Вплив мастильного матеріалу на кінетику розвинення зношування від контактної втоми пов'язують також з його впливом на коефіцієнт тертя та ефектом адсорбційного зниження міцності поверхневих шарів металу під дією поверхнево-активних компонентів мастильного матеріалу (ефектом Ребіндера), а також з процесами хімічної взаємодії мастильного матеріалу з поверхнею металу в процесі тертя. Так, більше значення коефіцієнта тертя забезпечує більш високий рівень діючих у зоні контакту поверхневих напружень, а адсорбований шар молекул поверхнево-активних компонентів мастильного матеріалу, знижуючи поверхневий натяг металу, зумовлює його пластичну течію в поверхневому шарі.

У разі застосування мастильних матеріалів одного типу, але різної в'язкості, кількість циклів до виникнення втомного викришування тим більша, чим вища в'язкість мастильного матеріалу. Таку закономірність пов'язують із впливом в'язкості на можливість проникнення мастильного матеріалу в початкову тріщину. Значному пришвидшенню процесу втомного зношування сталей у вузлах тертя кочення сприяє наявність у мастильному матеріалі води [20; 45]. Останнє пояснюється насиченням поверхневих шарів металу воднем і проявом водневого окрихчування, до якого особливо схильні підшипникові сталі.

Поряд з уявленням про втомний механізм віспоподібного зношування існують теорії, які ґрунтуються на контактнo-гiдродинамiчному ефектi дiї мастильного матерiалу, i теорії, що пояснюють розвиток віспоподібного зношування утворенням i руйнуванням на поверхнях контакту спряжених деталей осередків зварювання.

Згiдно з контактнo-гiдродинамiчною теорiєю мащення [46] при коченнi або коченнi з проковзуванням дiя мастильного матерiалу на контактну витривалiсть поверхневих шарiв металу проявляється-

ся головним чином через пік гідродинамічного тиску в зоні виходу спряжених поверхонь із контакту. Цей пік створює різко виражену концентрацію напружень. Особливо сильний вплив на контактні напруження пік гідродинамічного тиску справляє при терті кочення з проковзуванням, коли сили тертя, що виникають у контакті, підвищують напруження в поверхневому шарі матеріалу на поверхнях, що відстають, і зменшують їх на випереджувальних поверхнях. Такий механізм зношування, очевидно, діє тільки за умов рідинного тертя.

Розвиток віспоподібного зношування як результат утворення і руйнування осередків зварювання металів у місцях контакту потребує значної пластичної деформації, що можлива за умов виникнення у місцях фактичного контакту напружень, які перевищують границю текучості металу (схоплення першого роду) або нагрівання поверхневих шарів металу в зоні тертя до температур його розм'ягчення (теплове зношування або схоплення другого роду) [44].

Утомне викришування, яке є основною причиною вибракування більшості підшипників кочення загального машинобудівного призначення, не завжди є характерною причиною втрати працездатності підшипників кочення авіаційних машин. Це зумовлено високими вимогами, які ставляться до підшипникових вузлів кочення авіаційних конструкцій, передусім вимогами абсолютної надійності, що потребує установлення підшипників з певним запасом за вантажопідйомністю.

Дослідження стану підшипників кочення авіаційних машин, що відпрацювали ресурс, дозволили визначити такі основні причини, за якими вони можуть бути визнані непридатними для подальшої роботи [47]: збільшення внутрішніх зазорів у підшипнику за підвищеного зносу поверхонь тертя, пошкодження поверхонь деталей підшипників корозією, несправності сепаратора, підвищене тертя в підшипнику.

Під час ремонту АТ багато підшипників кочення використовують повторно. Разом з цим залишкова довговічність таких підшипників багато в чому буде визначатись нагромадженням ранніх явищ контактної втоми на біжучих доріжках кілець і тіл кочення, що передують викришуванню. Попередження відмов підшипникових вузлів кочення внаслідок утомного викришування потребує застосування спеціальних методів діагностування їх

технічного стану для своєчасного виявлення початкової стадії такого процесу. Тонкі структурні зміни матеріалу робочих поверхонь розбірних підшипників кочення, що передують розвиненню викришування, з наступним прогнозуванням їх залишкової довговічності можна оцінити методом вихроструминної дефектоскопії [48]. Стан підшипників у процесі експлуатації і ТО можна діагностувати за параметрами вибігу роторів, контролем температури підшипника, аналізу оливи на вміст металевих частинок, контролем рівня шуму, вібрацій тощо. Більшість із методів діагностування підшипників ґрунтуються на тому, що розвиток їх пошкоджень до виходу із ладу проходить поступово протягом тривалого часу напрацювання і супроводжується зміною деяких прогнозних параметрів роботи підшипникових вузлів [20].

5.5. Механізм та закономірності ерозійного зношування

Ерозія в широкому понятті – це процес руйнування тіл, речовин під впливом зовнішнього середовища. У триботехнічних системах під ерозією розуміють процес руйнування (зношування) поверхні матеріалів унаслідок механічної дії високошвидкісного потоку рідини, газу або пари.

Процеси ерозійного зношування класифікують [49]: за механізмом зношування – механохімічна, мікроударна, термічна, електроерозійна; за умовами перебігу – гідроерозія, абразивна ерозія, ерозія при кавітації, абляція; за характером розподілу пошкоджень – локальна, суцільна.

Кожен вид ерозії має підвиди, які поєднують характерні ознаки окремих видів. Наприклад, газоабразивне і гідроабразивне зношування є підвидом відповідно газової і гідроерозії в поєднанні їх з абразивною. Підвидом газової ерозії може бути газоелектрична ерозія, абляція тощо. Класифікацію видів ерозійного зношування подано на рис. 5.5.

Складність вивчення механізму і встановлення закономірностей для різних процесів ерозійного зношування полягає у різноманітності фізико-хімічних явищ, що викликають поверхневе руйнування матеріалів, складному характері їх взаємодії, а також у великій кількості зовнішніх та внутрішніх факторів, що можуть одночасно діяти і впливати на характер та форми прояву пошкоджуваності деталей машин [49].

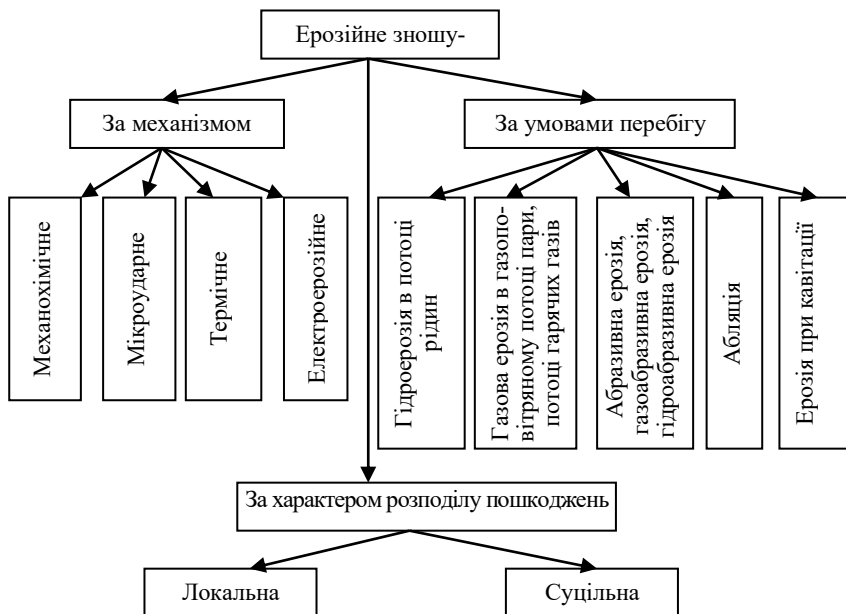


Рис. 5.5. Класифікація видів ерозійного зношування

Газову ерозію розглядають як явище руйнування матеріалів під дією механічних і теплових сил молекул газу. В авіаційних конструкціях газова ерозія часто супроводжується процесами хімічної та високотемпературної газової корозії, термічної втоми, абразивними процесами, спільна дія яких значно пришвидшує інтенсивність поверхневого руйнування. Подібними ефектами, зокрема корозією і абразивними процесами, може супроводжуватись ерозійне руйнування в потоці рідин.

Найбільш високі швидкості газового потоку досягаються у проточній частині компресора і турбіни ГТД. Так, у сучасних ГТД осьова швидкість газоповітряного потоку по проточній частині компресора становить 120 ... 200 м/с. Під час експлуатації в різних кліматичних і висотних умовах температура газоповітряного потоку може становити від 223К на вході у компресор до 773К на виході із компресора. Під дією високошвидкісного газоповітряного потоку, що протікає у вузькому зазорі між торцевою поверхнею робочих лопаток і ущільнювальним покриттям кілець розвивається такий вид ерозійного руйнування, як абляція. При цьому за рахунок зносу, який в основному припадає на матеріал ущільнювального покриття, відбувається збільшення радіального зазору.

Сутність явища абляції полягає у дії потоку газоповітряних молекул на поверхню матеріалу і руйнуванні тонкого поверхневого шару, який безпосередньо стикається з газовим потоком. Абляція, як правило, супроводжується тепловими і механічними ефектами, а механізм абляційного руйнування матеріалів може включати ряд одночасно діючих процесів: зрізання матеріалу від дії аеродинамічних зусиль, ерозію від ударів абразивних або інших твердих частинок, розтріскування і відпадання лусок матеріалу внаслідок ефектів теплового розширення, сублімацію, випаровування, згоряння, здування розмягченого чи розплавленого матеріалу потоком газів.

Із даних, наведених у праці [50] (рис. 5.6), видно, що відносний радіальний зазор на різних ступенях компресора одного із турбогвинтових ГТД уже після 800 год напрацювання може змінюватись від 0,7 % на першому ступені до 2,5 % на останніх ступенях з наступним інтенсивним його зростанням зі збільшенням часу напрацювання двигуна. Збільшення радіальних зазорів компресора призводить до зниження напору газоповітряного потоку і втрати коефіцієнта корисної дії (ККД) двигуна. Із цієї причини під час ремонту ГТД майже 100 % робочих кілець компресора потребують відновлення ущільнювального покриття.

Механізми газо- та гідроабразивного зношування розглядаються як процеси, що поєднують у собі механізми руйнування матеріалів відповідно від газової та гідроерозії і абразивного руйнування під ударною дією абразивних або інших твердих частинок. Потік газу (рідини) руйнує оксидну плівку на поверхні металу, а тверді частинки, що містяться в потоці газу (рідини), втрачаючи свою кінетичну енергію під час вдаряння по поверхні, спричиняють більш інтенсивне руйнування.

Питання газоабразивного зношування деталей авіаційних конструкцій детально розглянуто в праці [20]. Особливо яскраво цей вид ерозійного руйнування проявляється на деталях газоповітряного тракту гелікоптерних ГТД таких, як робочі і напрямні лопатки компресора. Ступінь зносу лопаток часто підвищується від перших до останніх ступенів компресора, що пов'язують зі зростанням об'ємної концентрації абразивних частинок у газовому потоці в разі зменшення перерізу газоповітряного тракту, а також зі збільшенням кількості абразивних частинок унаслідок їх дроблення від співударяння з лопатками попередніх ступенів.

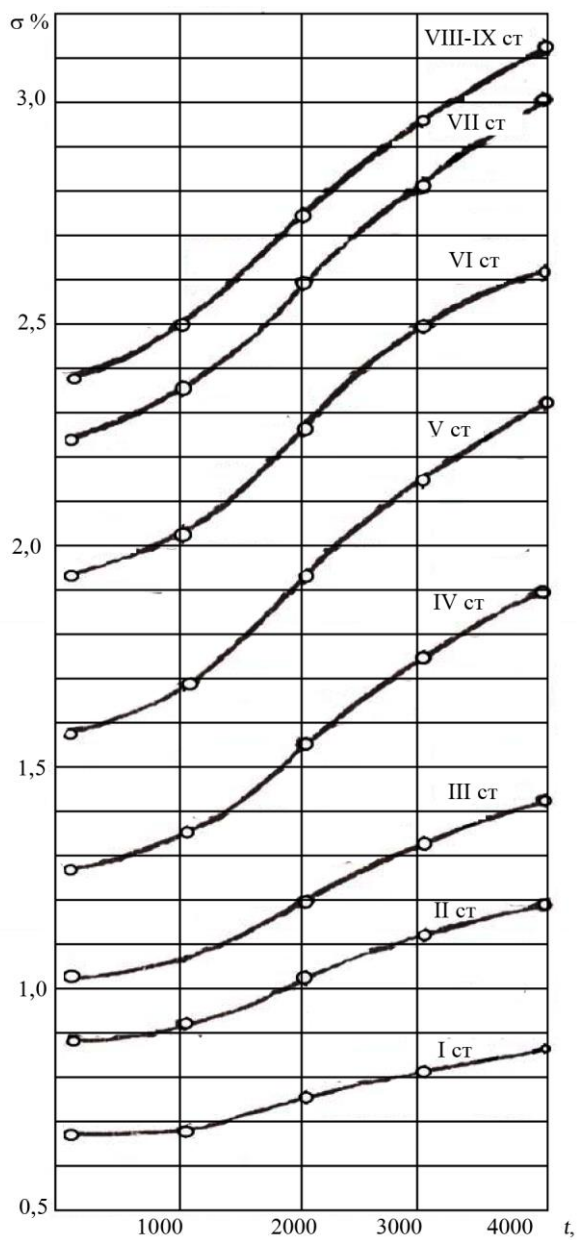


Рис. 5.6. Зміна відносного радіального зазору в проточній частині компресора одного із ГТД турбо-гвинтового типу від напруцювання

Інтенсивність зношування металів у процесі газоабразивного зношування за інших рівних умов залежить від твердості та розміру абразивних частинок, їх швидкості в момент ударяння по поверхні, кута падіння.

Установлено [51], що зносостійкість технічно чистих металів унаслідок газоабразивного зношування під малим кутом падіння ($<45^\circ$) абразивних частинок, як і зношування по закріпленому абразиву [52], прямо пропорційна твердості металу. За кутів падіння понад 45° така залежність не спостерігається.

За гострих кутів падіння величина ударного імпульсу абразивних частинок нижча, ніж за кутів падіння, близьких до 90° . За такого характеру взаємодії абразивних частинок з матеріалом механізм його руйнування схожий з процесом абразивного мікрорізання.

Для твердих і крихких малопластичних металів найбільш інтенсивне зношування під дією потоку абразивних частинок спостерігається тоді, коли удари їх напрямлені по нормалі до поверхні. Для м'яких і пластичних металів, таких як, наприклад, м'які сталі, алюмінієві та деякі мідні сплави зношування є більш інтенсивним за умов переважної дії тангенціальних зусиль, тобто коли вектор швидкості абразивних частинок напрямлений під кутом до поверхні деталі [20; 53].

Газовоерозійне руйнування і газоабразивне зношування в початковий період на гладких поверхнях розвиваються повільно, а після появи уражених місць можуть істотно пришвидшуватись. Така закономірність пояснюється підвищенням крихкості пошкодженого поверхневого шару металу у зв'язку з нагромадженням мікротріщин і посиленням ударної дії газоабразивного потоку через значне вихроутворення на пошкодженій поверхні.

Від газової ерозії і газоабразивного зношування в газоповітряному потоці слід розрізняти газову ерозію і газоабразивне зношування в потоці високотемпературного газу, дії якого зазнають деталі турбін авіаційних ГТД. Процеси ерозійного руйнування в цьому випадку перебігають за умов розвитку різних знеміцнювальних ефектів: високотемпературної газової корозії, термічного розм'ягчення металу, термічного розкладання та вибіркового розплавлення окремих складових сплавів і т. ін.

Характерні дефекти деталей гарячої частини ГТД, що виникли унаслідок ерозійного руйнування в потоці високотемпературного газу, показано на рис. 5.7.

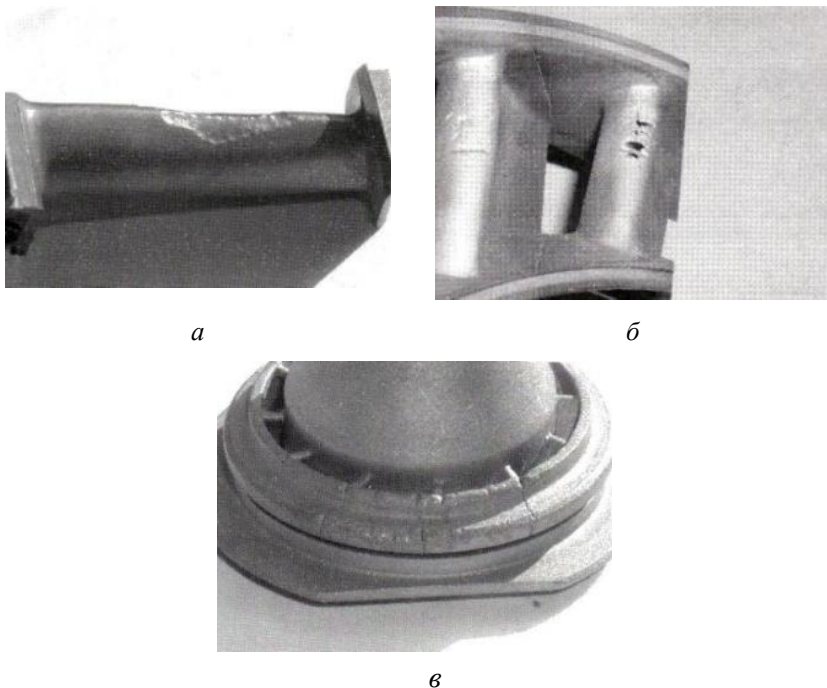


Рис. 5.7. Характер зносу деталей гарячої частини ГТД унаслідок ерозійного руйнування у високотемпературному газовому потоці:

a – робоча лопатка турбіни; *б* – сектор соплових лопаток;
в – завихрювач

У механізмі зовнішнього силового впливу на поверхню металу абразивної частинки, що переміщується високошвидкісним потоком газу (рідини) можна виділити два етапи. Перший етап характеризується впливом абразивної частинки на поверхню металу і завершується її впровадженням у поверхневий шар (рис. 5.8). Головну роль на цьому етапі відіграють нормальні сили N і сили протидії з боку поверхневого шару металу N' (сили реакції), між якими на момент завершення впровадження частинки встановлюється рівновага.

На другому етапі абразивна частинка, що впровадилась у поверхню металу на визначену глибину, здійснюючи поступальний рух по поверхні, призводить до її руйнування і деформування.

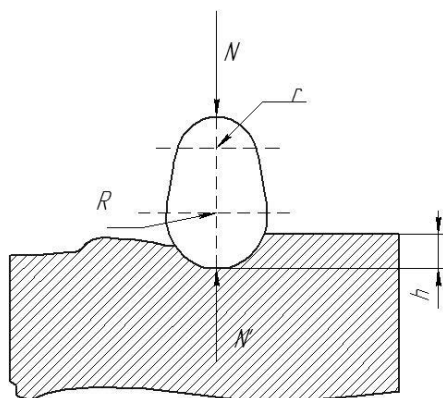


Рис. 5.8. Схема взаємодії одиначково-вільної абразивної частинки з поверхнею металу

Головну роль на другому етапі відіграють тангенціальні сили. Руйнування металу відбувається через повторні пружно-пластичні деформації. Тому в першому наближенні об'єм локального руйнування

$$V_{\text{лок}} = V_{\text{од.}}/n,$$

де $V_{\text{лок}}$ – об'єм локального зносу; $V_{\text{од.}}$ – об'єм зносу поверхні від руйнування одиначковою абразивною частинкою; n – кількість циклів переддеформування до руйнування.

Знаючи об'єм руйнування під дією однієї частинки, кількість частинок N , що діяли на поверхню і площу поверхні деталі S , можна визначити об'єм зношеного металу під дією N частинок:

$$V_{\text{к}} = NV_{\text{лок}} S.$$

На деталях агрегатів паливних та гідравлічних систем АТ поряд з гідроерозійним і гідроабразивним зношуванням часто проявляється зношування, зумовлене явищем кавітації [54].

Кавітаційне зношування має локальний характер і проявляється в утворенні на поверхні деталей місцевих поглиблень і каверн. Головною руйнівною силою, під дією якої відбувається кавітаційне руйнування, є мікроскопічні гідравлічні удари, що діють на поверхню металу при захопленні кавітаційних порожнин (бульбашок), які виникають з різних причин утворення розриву суцільності рідини.

За умовами прояву кавітація може бути поділена на такі види:

- профільну – виникає у разі відриву потоку рідини від поверхні профіля, що обтікається рідиною;
- щілинну – виникає за високих швидкостей руху потоку рідини в зазорах, через які рідина може прориватись;
- зривну – зумовлюється зривами потоку при обтіканні рідини нерівностей або перепон;
- вібраційну – виникає від дії на рідину чи деталь вібраційних або звукових коливань.

Тиск у середині кавітаційних бульбашок може сягати 120 ... 250 мН/м², швидкість співударів з твердою поверхнею 1000 м/с, а температура – 500 ... 993К [54; 55]. Під впливом багаторазових гідродинамічних ударів і циклів швидкого нагрівання та охолодження поверхневий шар металу зазнає циклічного деформування, що призводить до нагромадження дефектів, утворення мікротріщин і в кінцевому підсумку до руйнування і відокремлення від поверхні мікрооб'ємів металу.

Інтенсивність кавітаційного зношування залежить від властивостей рідини, природи матеріалу деталей, температури, енергетичних параметрів кавітаційної дії на поверхню деталі, стану поверхні. За умов роботи деталей в корозійно-активних рідинах інтенсивність кавітаційного зношування за інших рівних умов визначається співвідношенням механічної і корозійної складових руйнування [56].

5.6. Особливості розвитку контактних пошкоджень фретинг-корозією

5.6.1. Механізм і основні закономірності зношування металів в умовах фретинг-корозії

Фретинг-корозія – це вид зношування контактних поверхонь деталей, що виникає під час відносного руху в процесі мікропереміщень. Такий рух виникає унаслідок вібрацій, періодичних згинів або скручувань з'єднаних деталей.

Уперше поняття фретинг-корозії використано для визначення пошкодження, що виникало на поверхні сталевих деталей унаслідок їх відносного вібраційного мікропереміщення і супроводжувалось утворенням продуктів із характерним для оксидів заліза

червоно-коричневим кольором. У найбільш загальному значенні під фретинг-корозією розуміють явище руйнування контактних поверхонь металів під навантаженням унаслідок коливальних відносних переміщень з малою амплітудою в умовах дії корозійного (окиснювального) середовища.

Як вид зношування фретинг-корозія має такі відмінні особливості [57]:

- швидкість відносного переміщення контактних поверхонь унаслідок фретинг-корозії набагато нижча порівняно зі швидкостями у звичайних вузлах тертя ковзання;
- за малої амплітуди переміщень пошкодження унаслідок фретинг-корозії сильно локалізовані на площі фактичного контакту і значно утруднюється вихід із зони тертя продуктів зношування;
- циклічний характер фрикційно-контактної взаємодії і високі контактні навантаження створюють умови для інтенсивного розвитку в зоні тертя втомних явищ;
- зношування унаслідок фретинг-корозії супроводжується окисненням металів з утворенням на поверхні і в продуктах зношування їх оксидних або гідрооксидних сполук;
- процес фретинг-корозії відрізняється більшою інтенсивністю руйнування поверхні металів порівняно з іншими видами зношування. Причому, якщо наявність таких інтенсивних пасиваторів, як кисень може знижувати інтенсивність зношування під час звичайного тертя ковзання, то в умовах фретинг-корозії окиснювально-корозійні процеси пришвидшують інтенсивність поверхневого руйнування металів.

Необхідно розрізняти поняття зношування в умовах фретинг-корозії і зношування в умовах фретингу.

Зношування в умовах фретингу – це аналогічний фретинг-корозії за умовами фрикційно-контактної взаємодії спряжених поверхонь вид зношування, але на відміну від фретинг-корозії не супроводжується окиснювально-корозійними процесами. Такому виду зношування піддаються деталі, виготовлені з неметалевих матеріалів, або деталі з металевих сплавів під час роботи у вакуумі чи атмосфері інертних газів.

Термін «фретинг» або «фретинг-процес» часто застосовують для відображення характеру контактної взаємодії поверхонь, у результаті якого розвивається зношування фретингом або фре-

тинг-корозією, а термін «фретинг-пошкодження» – для характеристики дефектів, що виникають на поверхні деталі як наслідок таких видів зношування.

Дослідженнями дефектів деталей АТ установлено, що в умовах фретинг-корозії пошкоджуються такі елементи конструкції і групи деталей ПС і АД:

- у конструкції планера: елементи обшивки в місцях заклепкових з'єднань, вузли кріплення силових панелей, стики багажних і технічних люків, вузли навішення двигунів, рулів, шасі та ін;
- у конструкціях системи керування: елементи тяг, шарнірні з'єднання важелів, качалок, гвинтові пари піднімачів, опори закріпків і передкріпків та ін;
- у конструкціях злітно-посадкових пристроїв: деталі вузлів підвіски, елементи шарнірних і шліц-шарнірних з'єднань та тощо;
- у конструкціях ГТД: підшипникові опори валів, місця з'єднання і стикування робочих і напрямних лопаток, дисків, кілець, жарових труб, паливних форсунок, опори і ступки пристрою реверса тяги та ін;
- в агрегатах паливних і гідравлічних систем: вузли підвіски маятників, плунжерні і золотникові пари, підп'ятники шестеренних насосів тощо;

Найчастіше пошкодження фретинг-корозією відбувається в місцях пресових посадок на валах, у шліцьових, шпонкових, болтових і заклепкових з'єднаннях. У результаті розвитку фретинг-корозії змінюються геометричні розміри деталей, виникають глибокі локальні пошкодження контактних поверхонь, відбуваються збільшення зазорів чи заїдання у спряженнях. Унаслідок дії циклічних навантажень місця, пошкоджені фретинг-корозією, стають осередками втомного руйнування, що істотно знижує втомну міцність деталей.

Існуючі уявлення про природу фретинг-корозії в основному ґрунтуються на корозійно-механічному підході до механізму руйнування поверхні металів. Разом з цим щодо оцінювання ролі механічного і хімічного (корозійного) факторів при фретинг-корозії існують різні підходи.

У ранніх працях (1939 р. – Г. Томлінсон, 1953 р. – Фенг А.-Мінг, 1954 р. – Д. Годфрі, 1957 р. – Дж. Холлідей) провідна роль у

розвитку фретинг-корозії відводилась механічному фактору. Механізм зношування при цьому розглядається як послідовність таких процесів:

- відокремлення дрібних частинок вільного металу через руйнування адгезійних зв'язків, що утворились під час тертя, та руйнування мікровиступів шорсткості поверхні внаслідок їх механічній взаємодії;
- окиснення відокремлених частинок металу;
- абразивне стирання поверхонь оксидними продуктами зношування під час їх переміщення у зоні контакту.

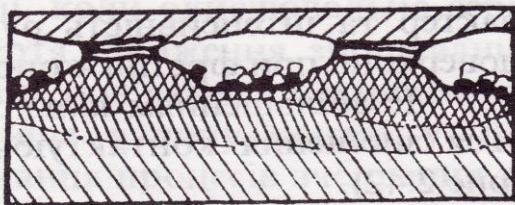
Одночасно і в більш пізніх працях розвивались теорії, у яких провідна роль у розвитку процесу фретинг-корозії відводилась хімічному фактору (1954 р. – Х. Уліг, 1961 р. – Р. Уотерхауз). Взаємодія металу з навколишнім середовищем призводить до окиснення і утворення оксидних плівок. Роль механічного фактора в цьому випадку зводиться до активації взаємодії металу з киснем, руйнування і видалення продуктів окиснення з поверхні металу.

Важлива роль у розгляді механізму фретинг-корозії відводиться втомним процесам [29; 57–59]. Вважається, що втомному руйнуванню поверхні металів від фретинг-корозії значною мірою сприяє коливальний циклічний характер тертя. Відомі також теорії фретинг-корозії, в основу яких покладено явища дифузійної взаємодії контактних металів і електроерозії [60; 61]. Але вони не набули подальшого розвитку.

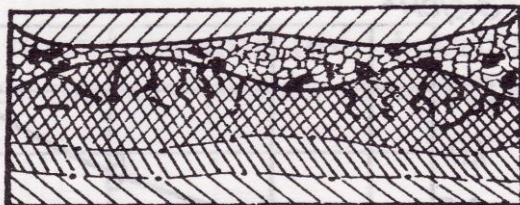
Найбільш повне уявлення про механізм фретинг-корозії дає теорія, що ґрунтується на стадійності процесів нагромадження і розвитку дефектів поверхневих шарів металу. Комплексний аналіз дозволив виділити три основні стадії перебігу процесу фретинг-корозії (рис. 5.9) [57].

На першій стадії (рис. 5.9, *a*) відбувається пластичне деформування мікронерівностей шорсткості поверхонь. У місцях фактичного контакту відбуваються процеси деформаційного зміцнення матеріалів спряжених поверхонь і циклічна текучість підповерхневих шарів. Одночасно руйнуються природні оксидні плівки, утворюються контакти ювенільних поверхонь і виникають вузли схоплення. Унаслідок руйнування мікровиступів і вузлів схоплення виникають первинні продукти зношування у вигляді дрібних частинок відокремленого металу, які надалі окиснюються.

а



б



в

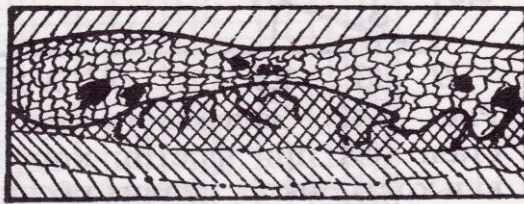


Рис. 5.9. Модель руйнування поверхні металів унаслідок фретинг-корозії

На другій стадії (рис. 5.9, б) швидкості утворення і видалення із зони контакту продуктів зношування зрівноважуються.

У зоні тертя формується стійкий прошарок з окиснених порошкоподібних продуктів зношування, які розділяють спряжені поверхні. Одночасно прошарок продуктів зношування виконує роль корозійно-активного середовища унаслідок адсорбції на оксидах кисню і води.

Зміцнені на першій стадії поверхневі шари сприймають більш помірні циклічні зусилля. У приповерхневих шарах продовжують нагромаджуватися втомні пошкодження з одночасним підвищенням хімічної активності металу. Інтенсивність зношування на цьому етапі відносно невелика і відбувається здебільшого за рахунок руйнування оксидних плівок, що утворюються на активних поверхнях металу, та абразивної дії окиснених продуктів зношування, які, як правило, мають значно вищу твердість ніж вихідний метал.

Третя стадія (рис. 5.9, в) характеризується підвищенням інтенсивності зношування. Поверхневі шари металу, які тривалий час сприймали циклічне контактне навантаження, з одночасним розвитком окиснювальних і корозійних процесів остаточно руйнуються і відбувається їх прогресивне відокремлення.

Поданий механізм описує розвиток фреттинг-корозії в умовах тертя без мастильного матеріалу за невеликих амплітуд відносного переміщення, помірних питомих контактних навантажень і невисоких температур. За таких умов провідними процесами поверхневого руйнування металів при фреттинг-корозії є окиснювально-втомні і корозійно-втомні процеси. За високих контактних навантажень, великих амплітуд відносного переміщення і підвищених температур переважний розвиток в умовах фреттинг-корозії можуть набути процеси адгезійної взаємодії і схоплення, а в разі великої твердості продуктів фреттинг-корозії – абразивне зношування.

Натепер жодна з існуючих теорій не може достатньою мірою описати всю різноманітність процесів, що відбуваються при фреттинг-корозії, та закономірності її розвитку. Разом з цим залежно від умов віброконтактного навантаження, властивостей матеріалів контактних пар, характеру навколишнього середовища переважна роль у розвитку фреттинг-корозії буде належати одному із провідних процесів, який і буде визначати характер та ступінь поверхневого руйнування.

Інтенсивність руйнування поверхонь металів унаслідок фреттинг-корозії, як і інших видів зношування, залежить від багатьох факторів – зовнішніх механічних дій, виду зовнішнього середовища та його хімічної активності, природи контактних матеріалів, властивостей продуктів зношування і т. ін.

Параметрами зовнішньої механічної дії є амплітуда відносного переміщення контактних поверхонь, питоме контактне навантаження, частота коливань, тривалість навантаження. На підставі узагальнення результатів досліджень, поданих у праці [57], можна визначити характерні закономірності впливу параметрів віброконтактного навантаження на розвиток фреттинг-корозії.

Величина зносу в умовах фреттинг-корозії зростає зі збільшенням тривалості віброконтактного навантаження (кількості циклів фреттингу), але інтенсивність зношування на різних стадіях процесу може бути непостійною. Найвища інтенсивність зношування зазвичай відзначається в початковий період фреттингу. Надалі

внаслідок окиснення поверхні металу і нагромадження в зоні контакту продуктів зношування інтенсивність зношування знижується. Якщо утворюються тверді продукти зношування і переважного розвитку набувають абразивні процеси, залежність величини зносу від кількості циклів фретингу може набувати лінійного характеру.

Підвищення амплітуди відносного переміщення контактних поверхонь також викликає зростання величини зносу. За невеликих амплітуд величина зносу зазвичай збільшується пропорційно амплітуді, але у певному діапазоні амплітуд інтенсивність зношування може різко збільшитися і залежність величини зносу від амплітуди набуде параболічного або експоненціального характеру.

Досі не існує будь-якого чіткого обґрунтування нижньої і верхньої амплітудних меж фретинг-корозії. Надшвидке зростання зносу спостерігається у випадках, коли амплітуда відносного переміщення перевищує величину пружних деформацій мікроступів шорсткості поверхонь, а також коли швидкість виходу продуктів зношування із зони контакту перевищує швидкість їх утворення. В останньому випадку важливу роль відіграє схема контактування спряжених поверхонь.

За умови постійної амплітуди відносних переміщень величина зносу, як правило, збільшується пропорційно-нормальному контактному навантаженню. Проте такий характер залежності спостерігається у разі збільшення навантаження до деякої критичної величини, вище від якої настає стабілізація, а згодом і зниження величини зносу. Така закономірність пояснюється зміною механізму зношування [57]. Якщо питомі контактні навантаження перевищують для даної пари матеріалів деяку критичну величину, то доступ кисню в зону контакту утруднюється. Унаслідок цього переважного розвитку набувають процеси схоплення, які супроводжуються взаємним перенесенням матеріалів між контактними поверхнями. Характер руйнування поверхонь при цьому змінюється від більш-менш рівномірного зношування до утворення глибоких локальних пошкоджень і наростів перенесеного металу.

Вплив частоти коливань на розвиток фретинг-корозії зумовлюється передусім зміною тривалості окиснювальних і корозійних процесів при дії на поверхню металу активних компонентів навколишнього середовища, а також температурними ефектами фрикційного нагріву. Із підвищенням частоти коливань у діапазо-

ні від одиниць до тисяч циклів за хвилину величина зносу знижується до деякого мінімального значення, а потім стабілізується і навіть може збільшуватись.

Зниження зносу з підвищенням частоти коливань пояснюється зменшенням часу окиснення металу і, як наслідок, зменшенням товщини поверхневих оксидних плівок. Тонкі оксидні плівки в умовах тертя стійкіше протистоять зношуванню [25], а також (із чисто геометричних міркувань) у разі руйнування їх внесок у загальну величину зносу буде меншим.

Хімічний фактор зростання частоти коливань конкурує з температурним фактором. Збільшення величини зносу за високих частот може зумовлюватись фрикційним нагрівом і зниженням міцності поверхневих шарів металу внаслідок підвищення в зоні контакту температури. Певний вплив на частотну залежність величини зносу від фретинг-корозії може справляти також зміна втомної міцності металів. Зниження частоти циклічного навантаження, як відомо, зменшує опір металів втомі.

Складний характер зміни мають температурні залежності зносу унаслідок розвитку фретинг-корозії [17; 58; 62]. Так, у праці [58] показано, що для металів, схильних до окрихчування, знос за від'ємних температур вищий ніж за нормальних. В області підвищених температур величина зносу з підвищенням температури до певного критичного значення, як правило, спочатку знижується, а потім може різко збільшитись навіть для високожароміцних сплавів [62].

Зниження величин зносу з підвищенням температури пов'язують з утворенням на контактних поверхнях міцно зчепленої з металом оксидної плівки, яка виконує роль твердого мастила і екранує поверхню металу від руйнування унаслідок схоплення. Захисні функції оксидної плівки зберігаються доти, доки матеріал основи внаслідок підвищення температури не втратить міцності і несучу відносно до оксидної плівки здатність. У разі руйнування оксидної плівки інтенсифікуються процеси схоплення, що супроводжуються глибинним руйнуванням контактних поверхонь.

Зношування багатьох деталей авіаційних конструкцій пов'язані з динамічним характером діючих контактних навантажень. При цьому залежно від початкового стану спряження (натягу чи зазору), величини статичного і динамічного навантаження в трибоспряженні можуть реалізовуватись різні схеми контактної взаємодії елементів трибосистеми (рис. 5.10) [17]:

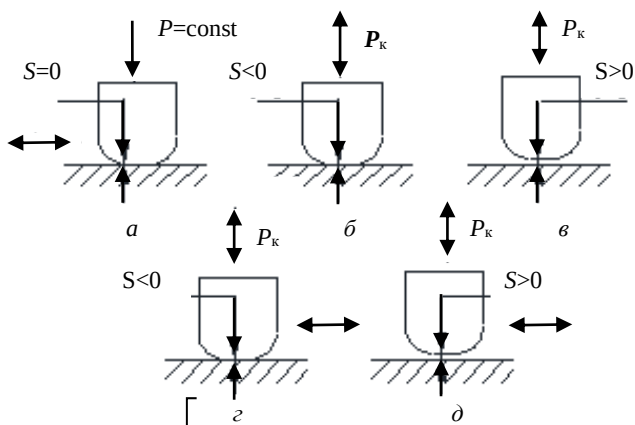


Рис. 5.10. Схеми контактної взаємодії поверхонь трибоелементів в умовах динамічного контактного навантаження

а) зворотно-поступальне ковзання за дії постійного статичного навантаження без розриву контакту;

б) взаємодія поверхонь без тангенціального ковзання і без розриву контакту під дією осцилювального динамічного навантаження (асиметричне стиснення);

в) взаємодія поверхонь під дією динамічного навантаження з розривом контакту без ковзання (ударна взаємодія);

г) взаємодія поверхонь в умовах прикладення динамічного навантаження і з одночасним осцилювальним зворотно-поступальним ковзанням без розриву контакту (динамічний фретинг);

д) взаємодія поверхонь в умовах прикладення динамічного навантаження з одночасним їх осцилювальним зворотно-поступальним ковзанням з розривом контакту (удар з проковзуванням – ударний фретинг).

У реальних трибосистемах взаємодія контактних поверхонь трибоелементів в умовах прикладення динамічного навантаження в режимі чистого удару без ковзання спостерігається досить рідко. Найбільш характерним видом контактної взаємодії для динамічно навантажених трибосистем є динамічний (без розриву контакту) і ударний (з розривом контакту) фретинг. Поєднання в таких умовах одночасної дії на матеріали трибопари тангенціальних вібраційних переміщень і нормальних до поверхні динамічних контактних навантажень, особливо у випадку їх поєднання у режимі ударного навантаження при розриві контакту, буде істотно впли-

вати на напружено-деформований стан взаємодійних поверхонь трибоелементів і динаміку розвитку кумулятивних процесів нагромадження пошкоджень. У зв'язку з цим механізм і закономірності зношування матеріалів в умовах динамічного контактного навантаження можуть істотно розрізнятись від процесів зношування у звичайних умовах фретинг-корозії.

Результати порівняльної оцінки зносостійкості титанового сплаву BT22 і сталі 40X2HMA, отримані під час випробування в умовах динамічного контактного навантаження в режимі ударного фретингу, динамічного фретингу і удару з коченням, показано на рис. 5.11.

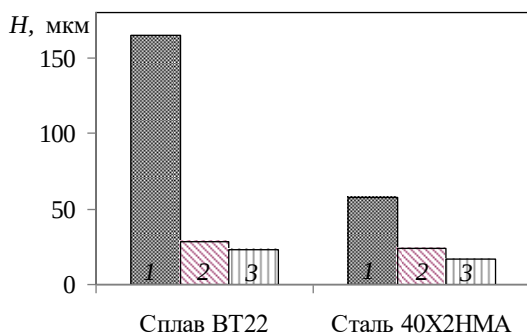


Рис. 5.11. Діаграма величин лінійного зносу під час випробування в умовах динамічного контактного навантаження: 1 – ударний фретинг; 2 – динамічний фретинг; 3 – удар з коченням. База випробувань $N = 1, 2 \cdot 10^5$ циклів

Випробування проводились за схемою контакту площина (зразок) – циліндр (контрзразок). Як контрзразки використовувались ролики із підшипникової сталі 95X18Ш (50 ...55 HRC). Установку і методику проведення випробувань описано в праці [63].

Під час моделювання умов динамічного фретингу (без розриву контакту) зразки установлювались з попереднім натягом із зусиллям 30 Н. При цьому сумарне зусилля від статичного і динамічного навантажень становило 60 Н. В експериментах з розривом контакту (ударний фретинг) зразки установлювались без натягу, динамічна складова навантаження становила 60 Н. Для виділення частки ударної складової у загальному зносі випробування проводились із жорстко закріпленим роликом (режим ударного і динамічного фретингу) і вільно закріпленим роликом (режим удару з коченням). Критерієм оцінювання зносостійкості була величина середньо-

го лінійного зносу, визначена за результатами замірів у місцях максимального виробітку зразків.

Аналіз діаграми величин зносу (рис. 5.11) показує, що найбільш інтенсивне зношування металів відбувається в режимі ударного фретингу з ударом із проковзуванням. Порівняно з режимом динамічного фретингу без удару величина зносу титанового сплаву BT22 і сталі 40X2HMA зростає відповідно у 6 і 2,7 разу. При цьому як у режимі ударного фретингу, так і у режимі динамічного фретингу більшу зносостійкість проявляє сталь 40X2HMA.

Частка ударної складової, яка може бути оцінена як різниця зносу зразків в умовах динамічного фретингу і при ударі з коченням, для сплаву BT22 і сталі 40X2HMA становить відповідно 10 % і 13,5 %. Отримані результати свідчать про те, що удар в умовах динамічного контактного навантаження робить істотний внесок у перебіг процесів зношування, а інтенсивність зношування за інших однакових умов контактної взаємодії елементів трибосистеми залежить від природи та властивостей матеріалу.

Механізм інтенсифікації зношування при ударному навантаженні можна розглядати як результат утворення в зонах контакту під час ударяння з наступним проковзуванням складного напружено-деформованого стану [17] та імпульсного характеру діючих навантажень, у результаті яких у поверхневих шарах матеріалу поширюються загасальні ударні хвилі деформації. У найпростішому випадку ударну хвилю можна розглядати як плоску хвилю, яка складається із поздовжньої, що викликає деформацію розтягнення–стиснення, і поперечної, що викликає деформацію зсуву [64]. Взаємодія ударної хвилі із хвилями деформації від тангенціального ковзання (фретингу) буде зумовлювати більш інтенсивне нагромадження в матеріалі дефектів структури, і, як наслідок, пришвидшення процесів утомного руйнування. Таким чином, можна зробити висновок, що однією із найбільш важливих характеристик, що визначають зносостійкість матеріалу при ударному фретингу, буде його здатність до розсіювання енергії хвиль деформації і релаксації виникаючих при ударянні в зонах контакту локальних екстремальних напружень.

Процеси релаксації контактних напружень і розсіювання механічної енергії, зумовлені дією динамічних навантажень, у свою чергу, тісно пов'язані з розвиненням у металах непружних явищ, викликаних внутрішнім тертям [22; 39]. Рівень і механізм внут-

рішнього тертя матеріалу контролюють найважливіші види дисипації механічної енергії. У разі високого рівня внутрішнього тертя демпфірування коливань деформаційні і теплові процеси локалізуються в більш тонких поверхневих шарах трибосистеми, що буде зменшувати об'єми металу, охопленого деградаційними процесами руйнування. Тому матеріали з високим рівнем внутрішнього тертя, який визначається декрементом загасання коливань, здатні більш ефективно розсіювати енергію і релаксувати локальні екстремальні напруження від динамічних навантажень. Із цієї позиції більш низьку зносостійкість сплаву VT22 порівняно зі сталлю 40X2HMA можна пояснити більш низьким рівнем у титанових сплавах декременту загасання коливань і його малою амплітудною залежністю, ніж у конструкційних сплавах на основі заліза [65]. Додатковим фактором, який впливає на рівень зносостійкості титанового сплаву може бути також менша твердість, рівень якої за ударно-циклічної взаємодії визначає характер і глибину поширення деформацій [66].

Описані закономірності поверхневого руйнування і зношування в умовах фретинг-корозії у загальному випадку характерні для більшості металевих матеріалів. Проте залежно від складу, структури, механічних і фізико-хімічних властивостей різні матеріали можуть мати свої особливості і чинити різний опір зношуванню.

5.6.2. Вплив фретинг-корозії на втомну міцність металів

Необхідною умовою розвитку фретинг-корозії є наявність відносного циклічного мікропереміщення між спряженими поверхнями деталей. Слід розрізняти два принципово різні випадки виникнення такого характеру контактної взаємодії. Перший пов'язаний з виникненням циклічних мікропереміщень незалежно від дії на деталі об'ємних циклічних навантажень, другий – з дією на деталі циклічних об'ємних навантажень. У другому випадку фретинг-корозія ініціює не тільки зношування контактних поверхонь деталей, але і їх більш швидке втомне руйнування.

Для дослідження впливу фретинг-корозії на втому металів застосовують два способи оцінювання циклічної міцності [57; 67]: спосіб роздільних випробувань на втому з попереднім нанесенням на зразки фретинг-пошкоджень і спосіб комбінованих випробу-

вань на втому з одночасним поєднанням фретинг-корозії з циклічним навантаженням.

Перевагою першого способу випробувань є можливість оцінювання «в чистому вигляді» впливу зовнішніх параметрів контактних навантажень (амплітуди відносного циклічного переміщення, питомого контактного навантаження, кількості циклів фретингу) на фретинг-втомну міцність. Випробування за другим способом більш близькі до умов роботи реальних деталей, що дає змогу визначати дійсне значення характеристик фретинг-втоми. Недоліком комбінованого способу випробувань є складність контролю і підтримання постійної амплітуди відносного переміщення. За такого способу оцінювання параметрів фретинг-втоми амплітуда відносного переміщення в зоні фретингового контакту є функцією прикладеного циклічного навантаження і залежить від форми та розмірів контрзразка - накладки.

У праці [68] нараховується понад 50 різних параметрів, які, на думку автора, можуть істотно впливати на фретинг-знос і фретинг-втому. Під час проведення досліджень з оцінювання ступеня зниження циклічної міцності внаслідок фретинг-втоми задаються такі основні параметри, як величина контактного тиску, амплітуда відносного переміщення, кількість циклів фретингу.

Результати оцінювання втомної витривалості трьох конструкційних титанових сплавів з різним рівнем міцності, отримані за методом роздільних випробувань на фретинг-втому, показано на рис. 5.12.

Як видно з рис. 5.12, ступінь зниження межі втоми під дією фретинг-корозійних пошкоджень тим більший, чим вища початкова втомна міцність сплаву.

Відповідно до умов випробування співвідношення $\sigma_{-1}^{\Phi}/\sigma_{-1}$ знижується від 0,87 для сплаву ВТ1-0 з найменшою початковою втомною міцністю до 0,64 для сплаву ВТ8 з найбільшою початковою втомною міцністю. Тобто сплави з більшою початковою міцністю більш чутливі до контактних пошкоджень фретинг-корозією. На аналогічну закономірність указують автори праці [69] за результатами оцінювання фретинг-втоми ряду конструкційних авіаційних сплавів.

Вплив фретинг-корозії на втомну міцність металів визначається здебільшого двома факторами [57; 58]: 1) утворенням в поверхневому шарі субмікро- та мікротріщин, розвинення яких під дією

об'ємного циклічного навантаження в кінцевому підсумку викликає остаточне втомне руйнування; 2) у місцях розвитку фретинг-корозії в результаті зносу і утворення локальних пошкоджень поверхонь створюється додаткова концентрація напружень. Більш високу чутливість до фретинг-корозійного пошкодження сплавів з більшою початковою міцністю в цьому випадку можна пояснити більшою їх чутливістю до концентрації напружень, а також збільшенням швидкості поширення фретингових тріщин зі збільшенням рівня діючого циклічного навантаження.

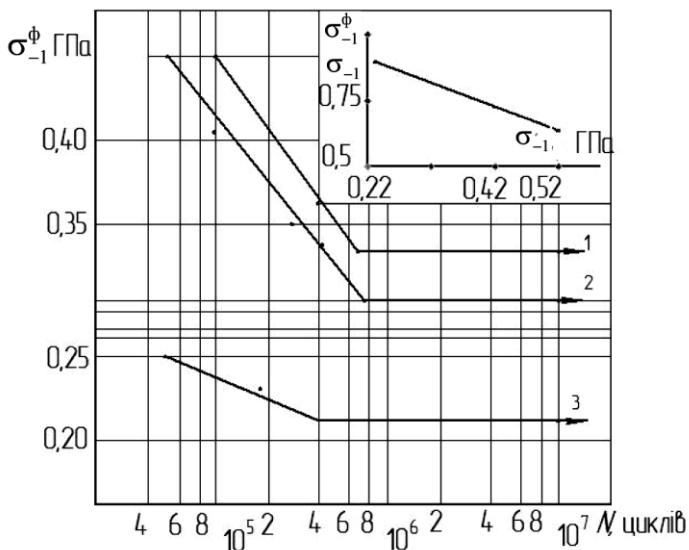


Рис. 5. 12. Діаграма втомної витривалості сплавів ВТ8(1), ОТ4(2), ВТ1-0(3) і зміна ступеня втрати їх втомної міцності за фретинг-утоми залежно від початкової величини межі втоми. Випробування на втому круглих зразків при згині з обертанням з попереднім нанесенням на робочу поверхню фретинг-пошкоджень. Умови нанесення фретинг-пошкоджень: питоме контактне навантаження $P=19,6$ МПа; амплітуда відносного переміщення $A=125$ мкм; частота коливань $\nu=25$ Гц; температура $T=293$ К; кількість циклів фретингу $N=2 \cdot 10^5$ циклів.

Матеріал контрзразків – Сталь45, термооброблена на твердість $Hv=5,9$ ГПа

Для з'ясування природи фретинг-утомного руйнування найбільш інформативними можуть бути залежності втомної довговічності від кількості циклів фретингу $N_p=f(N_\phi)$. Аналіз таких залеж-

ностей, отриманих для сплавів ВТ8, ОТ4 і ВТ1 -0 (рис. 5.13), показує, що уже на початковій стадії (до $N_{\phi} \sim 5 \cdot 10^4$ циклів фретингу) відбувається різке зниження втомної довговічності. Надалі зі збільшенням кількості циклів фретингу довговічність зразків до руйнування істотно не змінюється.

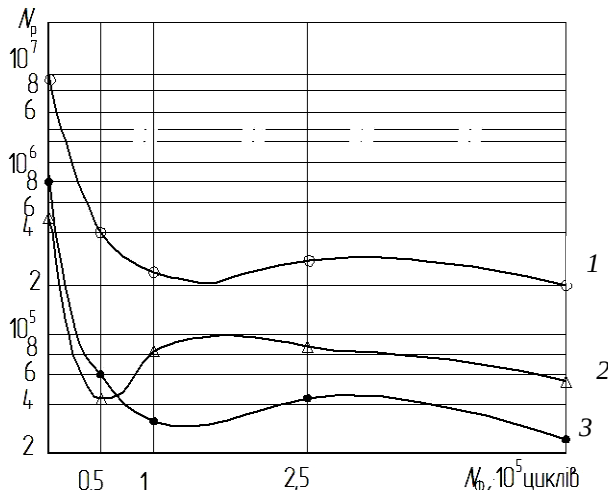


Рис. 5.13. Залежність довговічності до руйнування від кількості циклів фретингу за попереднього нанесення на зразки фретинг-пошкоджень:

1 – ВТ1-0; 2 – ОТ4; 3 – ВТ8. Напруження циклу симетричного знакозмінного навантаження: 1 – $\sigma_{-1}=0,2$ ГПа; 2 – $\sigma_{-1}=0,45$ ГПа; 3 – $\sigma_{-1}=0,55$ ГПа. Умови нанесення фретинг-пошкоджень: питоме контактне навантаження $P=19,6$ МПа; амплітуда відносного переміщення 1 – 2 – $A=100$ мкм, 3 – $A=150$ мкм; частота коливань $\nu=25$ Гц; температура $T=293$ К. Матеріал контрзразків – Сталь45, термооброблена на твердість $Hv=5,9$ ГПа

Подібна залежність $N_p=f(N_{\phi})$ характерна для інших конструкційних сплавів [57; 67; 69]. Очевидно, що зародження поверхневих дефектів таких, як субмікро- і мікротріщин, під впливом яких формується фретинг-втомна міцність металів, відбувається уже на ранніх стадіях розвитку фретинг-корозії. Швидкість росту тріщин буде передусім залежати від рівня об'ємного циклічного навантаження.

У реальних з'єднаннях деталей і конструктивних елементів, що зазнають одночасної дії циклічних навантажень і фретинг-корозії розподіл контактних напружень на контактних поверхнях

залежить від контактної жорсткості і визначається шорсткістю поверхонь та міцністю (твердістю) матеріалу. У загальному випадку контактні навантаження сприймаються окремими об'ємами поверхневого шару, розташованими в ділянках фактичного контакту. Зміщення мікровиступів шорсткості однієї поверхні відносно іншої унаслідок фретингу призводить до руйнування оксидної плівки на поверхнях протягом одного півциклу фази переміщення, відновлення її і повторного руйнування протягом другого півциклу.

Зрізання і деформування мікровиступів шорсткості та видалення оксидної плівки сприяють зближенню контактних поверхонь, утворенню адгезійних зв'язків і виникненню осередків схоплення.

У разі нежорсткої схеми контактної взаємодії і достатньої здатності матеріалів до зсувної деформації, що відповідає більшості реальних конструкцій, руйнування осередків схоплення відбувається після деякої кількості циклів фретингу за механізмом малоциклової втоми. У випадку відсутності об'ємного циклічного навантаження цей процес завершується утворенням субмікро- і мікротріщин, їх злиттям з наступним відокремленням частинок зносу. У випадку одночасної дії фретингу і об'ємних циклічних навантажень поверхневі мікротріщини продовжують розвиватись в макротріщину і далі в магістральну тріщину.

Таким чином, роль фретинг-корозії при фретинг-втомі зводиться до утворення в місцях фактичного контакту дефектного шару, ініціювання виникнення і зростання втомних мікротріщин, утворення за тривалої дії фретинг-корозії геометричних концентраторів напруження. Ступінь зниження втомної міцності та циклічної довговічності за умов одночасної дії контактних і об'ємних циклічних навантажень визначається як початковою міцністю матеріалу деталі, так і рівнем діючих циклічних об'ємних та контактних навантажень, амплітудою відносних вібропереміщень, поєднанням матеріалів у трибоспряженні та багатьма іншими факторами.

5.6.3. Діагностування фретинг-корозійних пошкоджень

Із розгляду механізму і закономірностей зношування металів в умовах фретинг-корозії випливає, що фретинг-корозія як вид зношування вирізняється різноманітністю форм руйнування поверхні. Зношування металів в умовах фретинг-корозії відбува-

ється унаслідок розвитку в зоні тертя схоплення, окиснювально-втомних, корозійно-втомних і абразивних процесів, кожен з яких зумовлює виникнення різних за характером дефектів поверхні. Причому в реальних умовах можуть накладатися кілька із зазначених процесів, а також поєднуватися фретинг-корозія з іншими видами контактних пошкоджень, що ускладнює розпізнавання фретинг-корозії за зовнішніми ознаками. Разом з цим у розвитку фретинг-корозії завжди можна виокремити провідний процес, який визначатиме загальну картину формування фретинг-корозійних пошкоджень.

Аналіз експлуатаційних дефектів деталей АТ показує, що за характером процесів, які перебігають в умовах фретинг-корозії, авіаційні деталі можна об'єднати у три основні групи:

- деталі, що працюють у нормальних атмосферних умовах та за помірно підвищених температур;
- деталі, що працюють за високих температур;
- деталі, що працюють у середовищі мастильних матеріалів та спеціальних рідин.

Деталі першої групи працюють в діапазоні температур 223 ... 423 К у середовищі повітря в умовах тертя без мащення або обмеженого мащення. Як матеріали для деталей першої групи найбільш широко використовуються високоміцні леговані сталі, алюмінієві, магнієві і титанові сплави.

Деталі другої групи працюють у діапазоні температур 423 ... 1273 К у середовищі гарячого повітря або продуктів згоряння авіаційного палива і додатково зазнають дії термічних напружень. Матеріали, що застосовуються для деталей цієї групи, можна поділити на два класи: 1) до температур 923 К – нержавіючі, жаростійкі і жароміцні сталі і титанові сплави; 2) за температур, вищих за 923 К – спеціальні жароміцні сталі і сплави на нікелевій та кобальтовій основі.

Як матеріали деталей третьої групи використовують спеціальні зносостійкі сталі та антифрикційні сплави на основі міді. Особливістю умов роботи деталей третьої групи є граничне або рідинне мащення тертьових поверхонь, невисокі робочі температури, утруднення доступу в зону контакту атмосферного кисню.

Залежно від умов роботи і функціонального призначення на робочій поверхні деталей авіаційних конструкцій можуть наноситись різного виду захисні покриття: термодифузійні, гальванічні, газотер-

мічні, твердомастильні тощо. Разом з цим, як свідчить досвід дефектації деталей під час ремонту АТ, і на таких деталях за тривалий час експлуатації можуть відбуватися знос покриття і характерні для контакту металевих поверхонь пошкодження.

Особливості умов роботи, властивостей матеріалів трибоспряжень і робочого середовища зумовлюють для кожної із виділених груп деталей переважний розвиток того чи іншого провідного процесу фретинг-корозії і як наслідок цього певний характер і ступінь пошкодження контактних поверхонь.

Ідентифікація дефектів як фретинг-пошкоджень може бути виконана за сукупністю діагностичних ознак, що визначають характер фрикційно-контактної взаємодії деталей у трибоспряженні, склад і колір продуктів зношування, топографію поверхні та мікроструктуру матеріалу в зоні пошкодження.

За результатами аналізу умов роботи трибоспряження встановлюється можливість відносного циклічного мікропереміщення деталей контактної пари, що необхідно вважати попередньою, але необхідною умовою для віднесення дефекту до фретинг-корозії. Зовнішніми факторами, які визначають можливість розвитку фретинг-корозії, можна вважати:

- наявність контакту між спряженими поверхнями деталей;
- загальне вібраційне навантаження вузла або дія хоча б на одну із деталей циклічних навантажень.

Для деталей, що працюють в атмосферних умовах, наявність оксидів на поверхнях контакту і в продуктах зношування є однією з основних діагностичних ознак розвитку фретинг-корозії. Характерні кольори оксидів для деяких металів і конструкційних металевих сплавів наведено у табл. 5.4 [70].

Таблиця 5.4

Характерний колір оксидів, що утворюється в умовах фретинг-корозії залежно від поєднання матеріалів контактних пар

№ з/п	Матеріал контактуючих пар		Колір оксидів
	деталь 1	деталь 2	
1	Технічне залізо	Технічне залізо	Темно-коричневий
2	Сталь хромиста, загартована	Сталь вуглецева	Темно-коричневий
3	Сталь хромиста, загартована	Аустенітна сталь	Світло-коричневий

№ з/п	Матеріал контактуючих пар		Колір оксидів
	деталь 1	деталь 2	
4	Сталь хромиста, загартована	Азотована сталь	Світло- червоно-коричневий
5	Сталь хромиста, загартована	Мідь, сплави міді	Коричневий, чорний, і червоно-коричневий
6	Сталь хромиста, загартована	Дюралюмін	Чорний
7	Дюралюмін	Дюралюмін	Темно-сірий, сіруватий
8	Азотована сталь	Мідь, сплави міді	Темно-коричневий, місцями зеленуватий
9	Сталь хромиста, загартована	Титановий сплав	Світло-коричневий, чорний
10	Титановий сплав	Титановий сплав	Чорний і сіро-білий

До складу продуктів зношування сталей і сплавів на основі заліза можуть входити оксиди α – Fe_2O_3 , Fe_3O_4 (γ – Fe_2O_3), FeO , частинки вільного металу, а за умов підвищеної вологості атмосфери повітря – гідрооксиди $\text{FeO} \cdot \text{H}_2\text{O}$ або γ – $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ [57]. У продуктах зношування високолегованих сталей можуть міститись також оксиди легувальних елементів такі, як Cr_2O_3 , NiO , TiO і складні оксиди зі структурою шпінелі типу FeCr_2O_4 та ін. Співвідношення оксидних фаз у продуктах зношування залежить від складу сплаву і зовнішніх умов фретингу. Зі збільшенням амплітуди відносного переміщення в продуктах зношування знижується вміст вищих оксидів і збільшується частка FeO і металу. За ідентифікації фретинг-пошкоджень необхідно враховувати, що α - Fe_2O_3 є високотемпературною формою окиснення заліза і, як правило, не утворюються за умов звичайної атмосферної корозії. Основною складовою продуктів атмосферної корозії заліза і сплавів на його основі є α - FeOOH .

У складі продуктів зношування алюмінієвих сплавів виявляються оксиди α - , γ - , і θ - Al_2O_3 , гідрооксидні з'єднання $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ або β - $\text{Al}(\text{OH})_3$ та металеві частинки. У плівках на поверхнях контакту виявляється оксид ν - Al_2O_3 . Природна оксидна плівка і продукти атмосферної корозії алюмінію і його сплавів складаються з α - Al_2O_3 або $\text{Al}(\text{OH})_3$.

У продуктах зношування сплавів на основі титану можуть бути наявні або лише оксид TiO_2 або суміш оксиду TiO_2 і нітриду TiN . Частин вільного металу у зв'язку з високою хімічною активністю титану, як правило, немає. У шарах оксидних плівок, що прилягають до поверхні контакту, виявляється переважно оксид TiO_2 , а в шарах, що прилягає до металу TiO . У звичайних атмосферних умовах титан і його сплави не кородують.

Залежно від параметрів віброконтактного навантаження і природи матеріалів контактної пари на поверхні деталей, що належать до першої групи, виявляються три характерні види фретинг-пошкоджень [70]: ямкове, борозенчасте і макроямкове.

Ямкове пошкодження являє собою сукупність ямок, що утворюються унаслідок відшарування з поверхні частинок окисненого шару або неокисненого металу. Цей вид поверхневого руйнування спостерігається, коли переважає розвиток окиснювально-втомних і втомно-корозійних процесів за умов невеликих амплітуд відносного переміщення і невисоких питомих контактних навантажень. Ямки являють собою заглиблення овальної форми, більша вісь яких напрямлена перпендикулярно до напрямку мікропереміщення. Бокові поверхні ямок мають ознаки квазістатичного з великим ступенем пластичної деформації або міжкристалічного руйнування. Розміри ямок змінюються залежно від параметрів віброконтактного навантаження і деформаційно-пластичних властивостей матеріалу. Для більшості конструкційних металевих сплавів розмір ямок становить 30 ... 80 мкм, а глибина досягає 10 ... 20 мкм.

Борозенчасте пошкодження характеризується утворенням на поверхні деталей сукупності борозенчастоподібних заглиблень (рисок), напрямок яких збігається з напрямком мікропереміщень, або розміщених до нього під невеликим кутом. Довжина борозенок може більше ніж на порядок перевищувати амплітуду відносного переміщення, а глибина досягає 80 ... 100 мкм.

Можна вказати на два механізми формування борозенчастого рельєфу. Відповідно до першого механізму борозенки утворюються унаслідок злиття ямок і є заключною фазою ямкового руйнування. Згідно з другим механізмом борозенки являють собою слід від абразивної дії окиснених і зміцнених частинок продуктів зношування на більш м'якій поверхні металу.

Макроямкове пошкодження (макрОВИРИВИ) можуть утворюватися у результаті утворення і руйнування вузлів схоплення або внаслідок багаторазового передеформування і утомного руйнування великих ділянок контактних поверхонь, що зазнають дії фреттинг-корозії. За зовнішнім виглядом і орієнтацією макроямковий рельєф схожий на рельєф, що утворюється унаслідок ямкового руйнування, але відрізняється значно більшими розмірами ямок. Цьому виду руйнування відповідають максимальна геометрична і структурна пошкоджуваність деталей, яка призводить до найбільшого зниження втомної міцності.

Мікроструктура металів, пошкоджених фреттинг-корозією у ході її розвитку за звичайних і помірно підвищених температур в атмосфері повітря характеризується такими відмітними ознаками:

- у зонах пошкодження під дією циклічних фрикційних навантажень метал пластично деформується. У приповерхневих шарах поблизу місць фактичного контакту спостерігається неупорядкована дефектна структура, у якій виявляються несуцільності у вигляді мікротріщин;
- унаслідок активації під час пластичного деформування дифузійних процесів поверхневі шари металу насичуються киснем з утворенням внутрішньоокиснених структур типу «метал–оксид». На поверхнях контакту утворюються вторинні структури у вигляді структурно-зв'язаних з металом оксидних плівок. Металографічно такі структури проявляються як структури, що відрізняються від металу основи травимістю і більш високою твердістю.

Оскільки в процесі фреттинг-корозії спостерігаються значні миттєві локальні підвищення температури [71] у зонах контакту відбуваються фазові перетворення і структурні зміни приповерхневих шарів металу, що відповідають перетворенням, які відбуваються у процесі термічного оброблення – гартування, відпуску, старіння. Глибина структурно-зміненого шару залежно від амплітудно-навантажувальних параметрів фреттингу і природи матеріалу деталі може змінюватись від 5 ... 10 мкм до декількох сотих мікрометрів.

Для деталей, що працюють у умовах високих температур, топографічною ознакою пошкодження фреттинг-корозією є наявність на контактних поверхнях на фоні відноснорівномірного зносу (або навіть за його відсутності) глибоких локальних пошкоджень у вигляді виривів і наростів, а також слідів зминання металу (рис. 5.14).



Рис. 5.14. Характер пошкодження поверхні деталей фретинг-корозією в умовах високих температур

За зовнішніми ознаками вириви нагадують макроямкове руйнування, але відрізняються значно більшими розмірами і глибиною. Місце розташування і профіль виривів досить точно відповідають наростам перенесеного металу на поверхні спряженої деталі. Зазначений характер пошкодження свідчить про переважний розвиток у зонах контакту схоплення та пластичної деформації, а також прояв в умовах високотемпературного фретингу контактної повзучості металу.

Схоплення є результатом руйнування на плямах фактичного контакту захисних оксидних плівок як наслідок втрати несучої здатності поверхні металу в разі досягнення деякої критичної температури нагрівання. Така температура може бути визначена експериментально і для кожного класу конструкційних жароміцних сплавів має певне значення [62]. За температур нижчих за критичне їх значення топографічні ознаки фретинг-пошкодження аналогічні ознакам, характерним для деталей, що працюють в умовах звичайних та помірно підвищених температур.

Мікроструктура, що формується унаслідок фретингу в умовах високих температур у зоні локальних пошкоджень контактних поверхонь, характеризується наявністю текстурованого шару з ознаками значного деформування металу, мікротріщинами, подрібненням і орієнтуванням зерен у напрямку мікропереміщень. На контактних поверхнях поза зоною локальних пошкоджень у більшості випадків виявляються вторинні структури у вигляді структурно-зв'язаної з металом оксидної плівки (рис. 5.15).

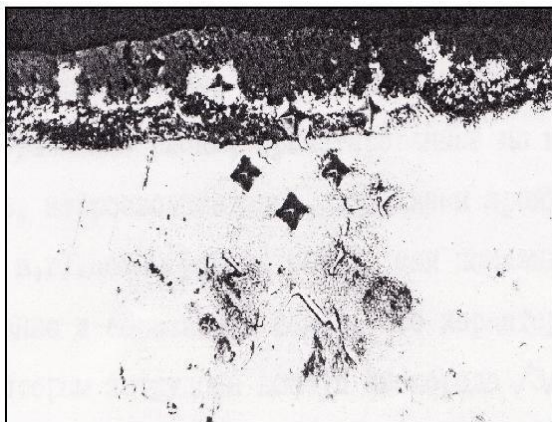


Рис. 5. 15. Мікроструктура поверхневого шару жароміцного нікелевого сплаву, що сформована в умовах високотемпературного фретингу х600

За даними рентгенофазового аналізу до складу таких плівок на нікелевих жароміцних сплавах входить оксид нікелю NiO і складні оксиди типу $\text{NiO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$, $\text{NiO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$.

Робота деталей в середовищі мастильних матеріалів накладає деякі особливості на розвиток фретинг-корозії, які визначають специфіку формування і відповідно діагностичні ознаки фретинг-пошкоджень. Наявність у зоні контакту будь-якого мастильного матеріалу не виключає фретинг-корозійного зношування трибоспряжень, але може значно знизити інтенсивність його зростання [22; 57]. Під дією мастила істотно змінюються умови фрикційно-контактної взаємодії поверхонь трибоконтакту: знижуються коефіцієнт тертя і рівень діючих на контактних поверхнях напружень, утруднюється доступ у зону контакту атмосферного кисню. Залежно від в'язкості мастильного матеріалу поліпшуються або погіршуються умови виходу із зони тертя продуктів зношування. У результаті хімічної взаємодії поверхні металів з активними компонентами мастильного матеріалу можуть утворюватись вторинні структури, відмінні за своєю природою від оксидів.

Більш низький порівняно з тертям без мащення рівень діючих циклічних контактних напружень від сил тертя і обмежений доступ у зону тертя кисню утруднюють переобіг окиснювально-втомних і втомно-корозійних процесів.

Інтенсивність окиснювальних (корозійних) процесів знижується зі зменшенням розчинності та здатності кисню дифундувати в середовищі мастильного матеріалу до поверхні металу.

Для деталей, що працюють у середовищі мастильних матеріалів або вуглецево-водневих рідин (авіаційний гас, гідрорідини), наявність ознак окиснення поверхонь контакту може бути побічною ознакою розвитку в трибоспряженні фретинг-корозії, але не завжди буде обов'язковою умовою для віднесення дефекту до фретинг-пошкодження. Крім оксидів, за фретингу в середовищі мастильних матеріалів на контактних поверхнях металів можуть спостерігатись поверхневі утворення органічного походження у вигляді лакоподібних плівок та пастоподібних нашарувань. До складу таких поверхневих утворень входять продукти окиснення компонентів мастильного матеріалу і їх взаємодії з металом – смолисті з'єднання, металеві мила тощо та конгломерати цих речовин з продуктами зношування. На відміну від оксидних плівок такі поверхневі утворення розчиняються у розчинах лугів і легко видаляються з поверхні металу, що може опосередковано підтверджувати їх органічне походження.

Якщо умови контактування деталей і властивості мастильного середовища перешкоджають доступу у зону тертя кисню, процес фретингу не супроводжується окисненням поверхні і продуктів зношування металу. У таких умовах поверхня деталей в місці фретингового контакту має металічний блиск.

У загальному випадку на поверхні деталей, що зазнають дії фретингу в середовищі мастильних матеріалів та різних вуглецево-водневих рідин, спостерігаються такі самі види поверхневого руйнування, як і за розвитку фретинг-корозії в атмосферних умовах за звичайних та помірно підвищених температур: ямкове, борозенчасте і мікроямкове. Ямковий і борозенчастий характер руйнування спостерігається переважно на деталях, що працюють за високих питомих контактних навантажень, коли кисень з атмосфери повітря має доступ у зону тертя і розвиток фретинг-корозії супроводжується утворенням на поверхні металу і в продуктах зношування оксидів. Макроямкове руйнування характерне для високонавантажених трибоспряжень таких, як, наприклад, болтові і шарнірні з'єднання шасі, або в умовах, коли мастильний матеріал не забезпечує ефективного розмежування поверхонь деталей чи

перешкоджає утворенню на поверхні металів захисної оксидної плівки.

Фрактографічні дослідження втомних зламів, виконані на зразках із представників трьох основних груп авіаційних конструкційних сплавів (сталь 30ХГСА, алюмінієвий сплав Д16Т, титановий сплав ВТ8) [72] дозволили установити такі діагностичні ознаки втомного руйнування, ініційованого фретинг-корозією:

- розміщення фокуса зламу в зоні фретингу і макроорієнтація до фретингового пошкодження втомних боріздов, що утворюються з розповсюдженням тріщин;
- наявність в осередку втомного руйнування пластично-деформованого і текстурованого об'єму у вигляді виступу нахиленої ділянки розвитку початкової мікротріщини;
- утворення східців скиду і вторинних тріщин в осередку руйнування у разі злиття тріщин від близько розташованих поверхневих дефектів (ямок, боріздов, коверн), утворених унаслідок розвитку фретинг-корозії;
- місцеве викривлення лінії фронту початкової тріщини у ділянці фретинг-пошкодження;
- велика швидкість розвинення магістральної тріщини в зоні впливу фретингу, що проявляється в збільшеній відносній ширині мікросмуг у цій зоні.

Згідно з існуючою кваліфікацією за звичайних умов утомного руйнування на втомних зламах виділяють три зони [73]: l_s – зону чисто втомного руйнування; l_d – перехідну зону, чи зону змішаного руйнування з ділянками ямкового, крихкого руйнування та втомних мікросмуг; l_r – зону статичного долома.

У зоні l_s розрізняють осередок і фокус зламу, які є відповідно макро- та мікроскопічним місцем зародження зламу.

Фретинг-утомний злам відрізняється від зламу чистого утомного руйнування наявністю зони l_f . Ця зона охоплює як фокус, так і осередок зламу. Схематичне розташування основних зон зламу і характер зародження та розповсюдження ініційованих фретинг-корозійним пошкодженням втомних тріщин показано відповідно на рис. 5.16, а, і рис. 5.16, б, в. Профіль зламу зразка зі сталі 30ХГСА ілюструє рис. 5.17, а.

У приповерхневих об'ємах, прилеглих до зон дії фретингу, металографічним аналізом виявляється пластична деформація і ділянки текстурованого матеріалу. На межі текстурованого мікро-

об'єму і матеріалу із незміненою структурою виникають умови для зародження мікротріщин. Початкові тріщини утворюються, очевидно, по площинах ковзання, які найбільш сприятливо розташовані до дотичних напружень. Вихід тріщини на поверхню під кутом $40^\circ \dots 50^\circ$ і наявність у зоні контакту зміцненого при пластичній деформації мікрооб'єму матеріалу зумовлюють утворення на одній із ділянок зламу характерного виступу, а на іншій – похилий розвиток початкової мікротріщини (рис. 5.16, б). Розміри виступу для конкретного матеріалу будуть залежати від розмірів плями контакту, величини та розподілу напружень у зоні контакту.

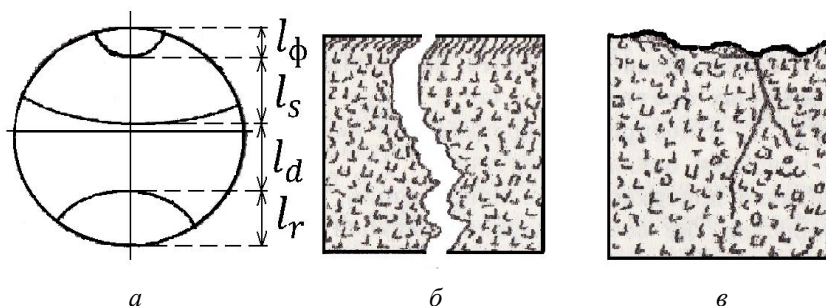


Рис.5.16. Схеми фретинг-утомного зламу (а), пластичної деформації поверхневого шару при утворенні виступу в зоні фретинг-пошкодження (б) і розвитку втомної тріщини від фретинг-пошкодження (в)

У разі подальшого циклічного навантаження напрямку розвитку тріщин змінюється на нормальне до поверхні. При цьому відбувається зміна напружено-деформованого стану біля вершини тріщини з площинно-напруженою біля поверхні у площинно-деформований під час розвинення тріщини у більш віддалені від поверхні об'єми металу.

Описаний механізм зародження і розповсюдження початкової тріщини фретинг-втоми спостерігається у більшості випадків, крім випадку, коли фретингові пошкодження (борозенки, вириви) виконують роль геометричних концентраторів напружень. У цьому разі тріщини розвиваються у напрямку, нормальному до поверхні (рис 5.16, в).

На зламах фретинг-утомного руйнування алюмінієвого Д16Т і титанового ВТ8 сплавів виявлялись такі ж зони, як і у сталі 30ХГСА, але будова зон має свої особливості.

На зламах алюмінієвого сплаву зони l_ϕ і l_s мають досить чітку межу (рис. 5.17, б).

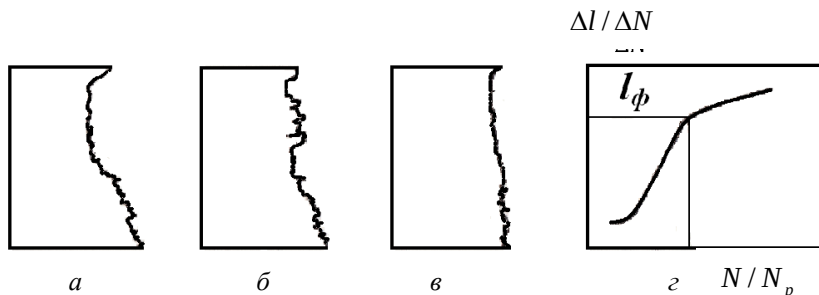


Рис. 5.17. Профілі фретинг-утомних зламів зразків із сталі 30ХГСА (а), сплавів Д16Т (б), VT-8 (в) та залежність швидкості росту тріщини (схема) $\Delta l / \Delta N$ у зоні l_ϕ від відносної довговічності N / N_p

У зоні l_ϕ тріщина розповсюджується транскристалічно. На цій ділянці спостерігається розширення мікросмуг від утомного розповсюдження тріщин порівняно зі зламами чистої втоми за однакового номінального рівня циклу напружень. Розширення мікросмуг свідчить про більш високу швидкість просування тріщини в зоні l_ϕ унаслідок розвинення фретинг-утоми (рис. 5.17, г). У зоні l_s злам характеризується грубим рельєфом, тріщина розповсюджується сколом по межі зерен, зміцнювальної фази і фрагментів текстури, що утворилась у ході прокатування.

На зламах титанового сплаву похилої ділянки розвинення початкової тріщини у зоні l_ϕ може не бути або вона матиме невелику протяжність. Найчастіше спостерігаються злами, у яких тріщини фретинг-утоми розвиваються під кутом $80^\circ \dots 90^\circ$ до поверхні, що може бути пов'язано з високою чутливістю титанових сплавів до концентрації напружень, які створюються поверхневими дефектами.

5.7. Критерії граничного і допустимого зносу елементів трибосистем та оцінювання працездатності матеріалів контактних пар

Трибологічні системи (трибосистеми) як складові частини складних технічних систем можуть перебувати як у справному, так і несправному стані, бути працездатними і непрацездатними, а також переходити у граничний стан. Взаємозв'язок технічних

станів елементів трибосистем (деталей трибоспряджень) та подій, що зумовлюють перехід їх з одного стану в інший, можна зобразити схемою, показаною на рис. 5.18 [5; 74].

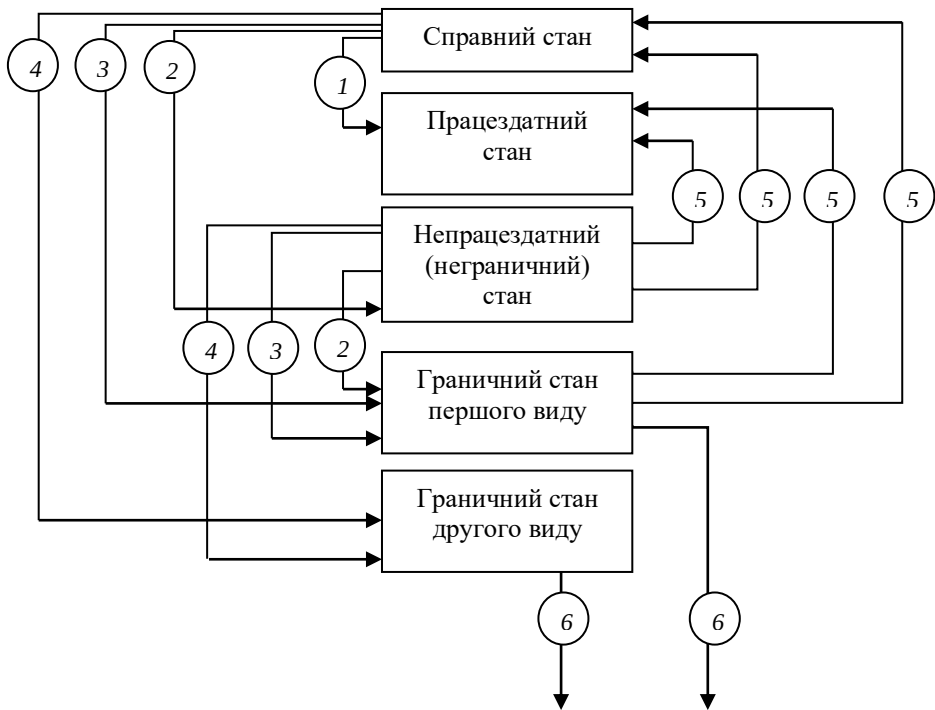


Рис. 5.18. Взаємозв'язок технічних станів елементів (деталей) трибосистем та подій, що зумовлюють перехід їх з одного стану в інший (події): 1 – пошкодження; 2 – відмова; 3 – перехід у граничний стан першого виду; 4 – перехід у граничний стан другого виду; 5 – відновлення працездатного стану; 6 – списання та утилізація деталі.

Утрата працездатності елементів трибосистем та перехід їх зі справного стану в несправний та граничний стан під час експлуатації зумовлені небажаними змінами деяких установлених параметрів та властивостей робочих поверхонь унаслідок перебігу процесу зношування. Критерій граничного стану може бути технічним і економічним.

Технічний критерій граничного стану визначається зміною розмірів і геометричної форми деталей, втратою міцності, жорсткості

ті, зміною умов тертя і зношування, механічними пошкодженням робочих поверхонь тощо.

Економічним критерієм граничного стану може бути збільшення питомих витрат на підтримання працездатності об'єкта (деталі, вузла, агрегату) шляхом впливів, що чиняться під час ТО, або зниження загальної економічної ефективності експлуатації машини.

Для спряжень технічним критерієм граничного стану є граничний зазор або гранична величина натягу, які утворюються деталями з граничним зносом.

У багатьох дослідженнях встановлено, що інтенсивність зростання зносу деталей і зміна зазорів у рухомих і номінально-нерухомих трибоспряженнях залежно від тривалості їх роботи відбуваються з певною закономірністю. У загальному випадку динаміку зростання зносу деталей і збільшення зазору у трибоспряженні можна подати закономірністю, яку показано на рис. 5.19.

Залежності, що відображають зростання зносу деталей і збільшення зазору у трибоспрямленні зі збільшенням тривалості напруцювання мають три характерні ділянки.

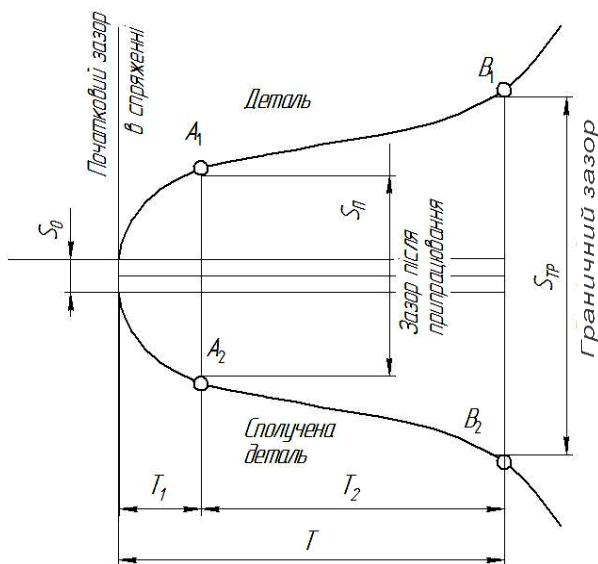


Рис. 5.19. Динаміка зростання зносу деталей і зміни зазору у трибоспряженні

Перша ділянка (період T_1) характеризує зношування деталей у початковий період, коли відбувається припрацювання тертьових поверхонь. Процеси фрикційно-контактної взаємодії на початковій стадії періоду припрацювання характеризуються високою інтенсивністю зношування деталей і відповідно високою швидкістю зростання зазору (або втрати натягу) у трибоспряженні. У цей період у результаті інтенсивної пластичної деформації і фізико-хімічної взаємодії металу з активними компонентами навколишнього середовища поступово трансформуються поверхні контакту, знижується інтенсивність зношування. Основним наслідком такої трансформації, що визначає перехід роботи пари тертя в режим усталеного зношування (друга ділянка період T_2), є формування оптимальної для заданих умов тертя фактичної площі контакту і утворення захисних поверхневих плівок вторинних структур за механізмами явища структурного пристосування [25].

У номінально-нерухомих трибоспряженнях, деталі яких зношуються унаслідок розвинення фретинг-корозії, додатковим ефективним фактором зниження і стабілізації інтенсивності зношування при переході з періоду T_1 у період T_2 може бути формування у зоні контакту прошарку продуктів зношування, за винятком умов, коли продукти зношування одночасно виконують роль активного абразивного середовища.

Третя ділянка (ділянка, що лежить за точками B_1 і B_2 кривих зносу) характеризується різким підвищенням інтенсивності зношування деталей і збільшенням зазору (зменшенням натягу) у трибоспряженні. Зазор (натяг) і знос деталей, що відповідають точкам B_1 і B_2 , називають граничними.

Досягнення граничної величини зазору (натягу) супроводжується порушенням умов нормальної роботи трибовузлів і часто закінчується відмовою та аварійним руйнуванням деталей.

Допустимий знос – це такий знос деталей, за якого трибоспряження може нормально функціонувати протягом терміну, не меншого ніж термін наступного міжремонтного строку служби виробу. Деталі з допустимим зносом признаються придатними до подальшої експлуатації і під час ремонту переустановлюється. Деталі із граничним зносом підлягають вибракуванню і заміні на деталі першої категорії або відновленню.

З огляду на можливість відновлення розрізняють граничний стан (граничний знос) деталі першого і другого виду. Із досягненням граничного стану першого виду деталь може бути відновлена. У разі досягнення граничного стану другого виду відновлення деталі неможливе. Наприклад, відновлення деталі технічно неможливе в результаті неприпустимої втрати міцності у випадку нагромадження незворотних явищ циклічної або термічної втомленості, старіння, міжкристалічної корозії, втрати міцності зі зменшенням робочого перерізу через надмірний знос тощо.

Деталям, що відновлюються механічним обробленням на новий ремонтний розмір, призначається ремонтний допуск. Ремонтним допуском називають максимальну товщину поверхневого шару робочої частини деталі, яку дозволяється видаляти під час ремонту виробу, у який входить деталь.

Обмеження цієї товщини пов'язано з граничнодопустимим розміром робочої частини деталі, за якого забезпечується збереження її запроєктованої міцності.

Граничні зазори (зноси) призначаються конструктором на основі теоретичних розрахунків, а також досвіду експлуатації попередніх конструктивних аналогів. Існують аналітичні методи розрахунку граничного зазора, міжремонтного і загальнотехнічного ресурсів спряжень, що працюють в умовах рідинного і напіврідинного тертя, а також граничного натягу для нерухомих з'єднань [75]. Аналіз цих методів показує, що теоретично можливо визначити граничний зазор або натяг, необхідний для нормального функціонування трибоспряження. Але швидкість (інтенсивність) зношування, необхідна для оцінювання як міжремонтного, так і загального ресурсу відповідно до установленого граничного зносу чи граничнодопустимого розміру деталі, залежить від умов роботи трибоспряження і не може бути визначена суто теоретичним шляхом [76].

Швидкість (інтенсивність) зношування в реальних умовах роботи трибоспряжень не є сталою величиною і являє собою складну багатофункціональну залежність, особливо у випадку динамічно навантажених трибосистем, що властиво авіаційним конструкціям. Для встановлення закону зміни інтенсивності зношування потрібні експериментальні дані, які можуть бути отримані на основі лабораторних досліджень, або за результатами визначення зносу деталей безпосередньо в процесі експлуатації чи під час

поточних та капітальних ремонтів із залученням статистичних методів оброблення даних.

Граничний зазор або граничний знос і граничнодопустимий розмір елементів (деталей) трибоспряджень є основними, але не невичерпними критеріями їх граничного стану. У ряді випадків перехід у граничний стан може визначатись наявністю інших дефектів, зумовлених технічними умовами на вибракування (утомні тріщини, місцеве викришування, подряпини і т. ін.). Призначаючи граничні зноси і зазори, необхідно враховувати, що погіршення технічного стану одного вузла чи агрегата унаслідок зносу може призвести до підвищення інтенсивності зношування інших, послідовно зв'язаних з ним вузлів і агрегатів. Так, наприклад, через знос зубців редуктора гелікоптера збільшується навантаження на вал хвостового гвинта, хрестовини шарнірів, хвостовий редуктор і навпаки.

Для обґрунтування критеріїв граничного стану і вибору методів підвищення довговічності та відновлення під час ремонту елементів трибосистем необхідно встановити основні причини, що зумовлюють їх перехід зі справного працездатного стану в непрацездатний та граничний стан. Тобто необхідно визначити критерії оцінювання працездатності матеріалів контактних пар. Як впливає із результатів статистичного аналізу (див. підрозділ 5.3) найбільше дефектів деталей авіаційних трибосистем спричинено розвитком фретинг-корозії.

Специфіка фрикційно-контактної взаємодії деталей в умовах фретинг-корозії і аналіз причин відмов трибовузлів, зумовлених цим видом зношування, дозволяє виділити такі критерії, що визначають працездатність матеріалів контактних пар:

- інтенсивність зношування і зношувальна здатність матеріалу деталі стосовно матеріалу спряженої деталі;
- величина і характер зміни коефіцієнта тертя у трибоспрядженні;
- об'єм продуктів зношування, що утворюються матеріалами контактної пари унаслідок фретинг-корозії;
- схильність до схоплення матеріалів спряжених деталей в умовах вібропереміщень;
- характер руйнування поверхонь.

Інтенсивність зношування матеріалу деталі і його зношувальна здатність стосовно матеріалу спряженої деталі є визначальним

критерієм у випадку, коли працездатність трибовузла порушується через втрату натягу або надмірного збільшення між деталями величини зазору.

У випадках, коли втрата працездатності настає внаслідок заклинювання та, як результат, втрати передбаченої конструкцією вузла здатності деталей до взаємного переміщення, основними критеріями оцінювання працездатності може стати значення коефіцієнта тертя матеріалів контактної пари та об'єм продуктів зношування, що утворюється цими матеріалами унаслідок фретинг-корозії.

Велике значення коефіцієнта тертя в трибоспряженнях, де розвивається фретинг-корозія, може відігравати як негативну, так і позитивну роль. Підвищенням коефіцієнта тертя і відповідно сили тертя можна знизити амплітуду відносного переміщення, а отже, інтенсивність зношування деталей трибоспряження. Одночасно велике значення коефіцієнта тертя для деталей, що піддаються фретинг-корозії і об'ємному циклічному навантаженню, може спричиняти зниження їх втомної міцності і пришвидшення утомного руйнування.

Об'єм продуктів зношування є основним критерієм працездатності для трибоспряжень, коли продукти зношування не мають вільного виходу із зони контакту і їх нагромадження може призвести до збільшення тиску між контактними поверхнями деталей. Наслідком збільшення тиску може стати заклинювання деталей трибоспряження та їх утомне руйнування.

Продуктами зношування унаслідок фретинг-корозії, як правило, є оксиди основного металу та металів, що входять до складу сплавів конструктивних елементів (деталей) трибоспряження. Об'єм продуктів зношування у такому випадку буде визначатись інтенсивністю зношування матеріалів контактної пари, хімічним складом їх компонентів і співвідношенням об'єму зношеного матеріалу до питомого об'єму оксидів, що утворились у процесі окиснення, яке з певним наближенням можна визначити за критерієм Піллінга – Бедфорда [77].

Класичним прикладом трибоспряжень, для яких визначальним критерієм працездатності є схильність до схоплення матеріалів спряжених деталей в умовах вібропереміщення, можуть бути прецезійні пари тертя агрегатів паливних і гідравлічних систем. Умовою нормальної роботи таких пар є мале значення і висока

стабільність сили тертя у трибоспряженні, а втрата їх працездатності у більшості випадків спричинена підвищенням тертя і виникненням заклинення деталей внаслідок утворення осередків захоплення. За таких умов поряд з високою зносостійкістю і низьким коефіцієнтом тертя під час вибору матеріалів пар тертя необхідно враховувати також схильність їх до захоплення.

Характер руйнування поверхонь (ямковий, борозенчастий, макроямковий) визначає ступінь зниження втомної міцності деталей під дією фретинг-корозії. Із характером руйнування також пов'язана товщина структурно-зміненого дефектного шару робочої поверхні деталі [70], який необхідно видалити під час відновлення деталі на ремонтний розмір, або підготовки до відновлення на початковий розмір одним із методів нарощування зношених поверхонь за допомогою додаткового матеріалу.

Розділ 6. ПРОГРЕСИВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНИХ ТРИБОСИСТЕМ

Для запобігання виникненню несправностей і відмов збільшення міжремонтних і загальнотехнічних термінів експлуатації таких складних технічних об'єктів, як ПС і АД, технологічні процеси їх виготовлення та ремонту повинні забезпечувати необхідний рівень якості виробу, включаючи якість виготовлення і ремонту (відновлення) окремих деталей.

Для деталей трибосистем, що швидко зношуються, основним показником якості є зносостійкість робочих поверхонь. Під зносостійкістю розуміють властивість матеріалу (деталі) чинити опір зношуванню у певних умовах тертя. Кількісно зносостійкість оцінюється величиною, яка є оберненою до інтенсивності або швидкості зношування. Для характеристики зносостійкості матеріалів (деталей), що піддаються зношуванню під дією фретингу і фретинг-корозії, часто застосовують поки що не стандартизований термін «фретингостійкість» [57]. Забезпечення високого рівня зносостійкості деталей трибосистем формуванням необхідних властивостей їх робочих поверхонь підпорядковано такому напряму трибологічних досліджень, як триботехнологія.

6.1. Загальні структурно-реологічні принципи створення поверхнево-зміцнених шарів та захисних покриттів

Аналіз результатів експериментальних і теоретичних досліджень з вивчення процесів тертя та зношування, зокрема, дослідження процесів фрикційно-контактної взаємодії і зношування в умовах фретинг-корозії, вказують на складний характер структурних і фізико-хімічних перетворень, що відбуваються в зоні фрикційного контакту. Ці перетворення відповідають як за механізм поверхневого руйнування матеріалів трибоспрями, так і за їх зносостійкість. Джерелом енергії для розвитку зазначених процесів є механічна енергія, що підводиться до трибосистеми від дії сил тертя, і теплова енергія від температури зовнішнього нагріву.

У загальному енергетичному балансі трибосистеми підведена механічна енергія пропорційна роботі сил тертя і витрачається

частково на генерацію тепла, а частково поглинається і нагромаджується поверхневим шаром матеріалу у вигляді прихованої внутрішньої енергії. Температура зовнішнього нагрівання визначає початкову внутрішню енергію матеріалів контактної пари. Реакцією трибосистеми на сумарну підведену механічну і зовнішню теплову енергію є формування рівноважного для заданих температурно-силових умов контактної взаємодії структурно-фазового та напружено-деформованого стану поверхневого шару матеріалів і сталих після визначеного періоду напрацювання триботехнічних характеристик – сили тертя та інтенсивності зношування.

Зв'язок між енергетичними параметрами трибосистеми і зносостійкістю визначається співвідношенням частки розсіюваної енергії, яка перетворюється в тепло, і частки енергії, що поглинається і нагромаджується матеріалом у вигляді прихованої внутрішньої енергії. Теплові ефекти впливають на температуру фрикційного нагрівання елементів трибосистеми, перебіг трибохімічних реакцій, формування структурно-фазового складу і властивостей поверхонь трибоконтакту. Нагромаджена матеріалом внутрішня енергія безпосередньо витрачається на проходження процесів поверхневого руйнування і зношування.

В умовах діючих динамічних контактних навантажень руйнування починається в місцях концентрації напружень після досягнення деякої критичної для матеріалу величини нагромадженої внутрішньої енергії. Таким чином, з енергетичної точки зору підвищення зносостійкості елементів трибосистеми може забезпечуватись:

- збільшенням частки розсіюваної і зменшенням частки нагромадженої матеріалами пари тертя внутрішньої енергії;
- підвищенням критичного рівня внутрішньої енергії, необхідного для розвитку активів руйнування матеріалу (енергії руйнування);
- зниженням рівня підведеної механічної енергії.

Найбільш ефективні механізми розсіювання (дисипації) механічної енергії в трибосистемах пов'язують з механізмами перебігу трибохімічних реакцій і механізмами, що визначають проходження дисипативних реологічних процесів та структурно-фазовими перетвореннями в зоні трибоконтакту [22; 78]. На такі трибо ефекти, як акустична емісія, фотоемісія, люмінісценція, електронна

емісія витрачається відносно невелика частка від дії сил тертя механічної енергії [79]. Тому енергетичний баланс трибосистеми з деяким наближенням можна подати таким рівнянням:

$$\theta_m = \theta_{xp} + \theta_p + \theta_c + \theta_n, \quad (6.1)$$

де θ_m – підведена до трибосистеми механічна енергія; θ_{xp} – енергія, що витрачається на трибохімічні реакції; θ_p – енергія, що розсіюється елементами трибосистеми за рахунок дисипативних реологічних процесів; θ_c – енергія, що витрачається на структурно-фазові перетворення; θ_n – внутрішня енергія, нагромаджена матеріалом поверхневого шару.

Ефективність трибохімічних механізмів дисипації енергії визначається термодинамічними характеристиками і кінетикою розвитку реакцій хімічної взаємодії активованих центрів металу з навколишнім середовищем. Результатом цих реакцій є окиснення відокремлених від поверхні первинних продуктів зношування та утворення на поверхнях тертя пасивувальних оксидних плівок. Для більшості металів теплоти утворення оксидів (зміна ентальпії системи) і ізобарні потенціали реакцій окиснення (вільна енергія Гіббса) характеризуються надто від’ємними значеннями [77] і перебігають з поглинанням значної кількості тепла. Додаткову енергію можуть поглинати оксиди, що утворюються на поверхні тертя під час їх пластичної течії [78] та диспергуванні. Ураховуючи високу твердість і міцність вторинних оксидних структур [25], можна очікувати, що втрата енергії на розвиток цих процесів буде значно вищою ніж для металів.

Реологічні механізми дисипації механічної енергії у фрикційному контакті пов’язують із проявом матеріалами контактної пари ефекту недосконалої пружності, який полягає у тимчасовій залежності діючих напружень від деформації. Така залежність, яку називають напруженістю або в’язкопружністю, за динамічних навантажень викликає дисипацію підведеної механічної енергії.

У сучасній теорії реології в’язкопружного фрикційного контакту [22; 34] виділяють два види реологічної дисипації: поверхневу, яка реалізуються безпосередньо в зоні фрикційного контакту в результаті імпульсної адгезійно-зсувної взаємодії мікровиступів шорсткості поверхні, і об’ємну, що розвивається в прилеглих до зон фактичного контакту приповерхневих об’ємів матеріалу внаслідок поширення в них циклічних хвиль деформації.

Процес адгезійно-зсувної дисипації моделюється поведінкою під навантаженням реологічного тіла Фойтта і за умов дії циклічних зсувних зусиль описуються такими співвідношеннями [34]:

$$S_0 = \gamma_0 G \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 Y_k}; \quad (6.2)$$

$$\bar{P}_v = \frac{1}{2} G \operatorname{tg} Y_k \gamma_0^2 \omega, \quad (6.3)$$

де S_0 – амплітуда зсувних напружень; $\bar{P}_v$ – середня величина механічної енергії, що розсіюється за період в одиниці об'єму (потужність дисипації енергії); $\gamma_0 = x_0 / h$ – градієнт деформації; G – модуль зсуву; ω – частота циклічного зсувного зусилля; Y_k – кут контактних втрат.

Параметр $\operatorname{tg} Y_k$ у рівняннях (6.2), (6.3), який є мірою розсіювання енергії коливань, називають контактним внутрішнім тертям. Він пов'язаний з модулем зсуву і контактно-динамічною в'язкістю співвідношенням:

$$\operatorname{tg} Y_k = \frac{\omega \eta}{G},$$

де η – динамічна в'язкість.

Аналіз рівнянь (6.2), (6.3) показує, що з підвищенням контактного внутрішнього тертя збільшується як потужність дисипації енергії, так і амплітуда зсувних зусиль. Очевидно, що за таких умов для кожного поєднання матеріалів контактної пари і температурно-силових умов їх фрикційного навантаження повинен існувати певний баланс енергетичних втрат і динамічних контактних напружень, які за інших однакових умов визначаються динамічною в'язкістю фрикційного контакту.

Об'ємну дисипацію визначають як дисипативний релаксаційний процес, що охоплює прилеглі до зон фактичного контакту об'єми матеріалу. Механізми такої дисипації в умовах динамічного навантаження пов'язують з механізмами об'ємного внутрішнього тертя [40], які одночасно є механізмами релаксації динамічних напружень.

Процес в'язкопружної об'ємної деформації унаслідок дії періодичної зсувної сили в цьому випадку моделюється реологічною

моделлю Максвелла, а дисипативні властивості системи визначаються такими співвідношеннями [34]

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} Y_v &= \frac{G}{\omega \eta}, \\ S_0 &= \frac{G \gamma_0}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 Y_v}}, \end{aligned} \quad (6.4)$$

де S_0 – амплітуда напружень; Y_v – кут об’ємних втрат.

Параметр $\operatorname{tg} Y_v$ за аналогією з параметром $\operatorname{tg} Y_k$ називають об’ємним внутрішнім тертям. Його величина, як і величина логарифмічного декримента коливань $\delta = \pi \operatorname{tg} Y_v$, характеризує релаксацийну здатність матеріалу під час динамічного навантаження.

Із аналізу рівняння (6.4) випливає, що чим більше об’ємне внутрішнє тертя (об’ємна дисипація), тим нижчий рівень діючих у приповерхневих шарах матеріалу динамічних напружень. Тобто можна зробити висновок, що наявність у матеріалах контактної пари ефективних джерел дисипації енергії, які працюють за механізмами об’ємного внутрішнього тертя, є одним із важливих факторів як зниження внутрішньої енергії трибосистеми, що витрачається на розвиток актив руйнування, так і динамічної напруженості зон фрикційного контакту.

До окремого виду реологічних дисипативних процесів можна віднести структурну релаксацію. Один із видів такої релаксації проявляється при структурно-фазових перетвореннях, у результаті яких формуються максимуми внутрішнього тертя та відбирається значна частка підведеної до трибосистеми енергії.

У реальних умовах усі розглянуті вище види дисипативних процесів розвиваються одночасно. Формування дисипативно-релаксацийних властивостей і зносостійкості трибосистеми необхідно розглядати з позиції взаємного впливу трибохімічних, реологічних і структурно-фазових механізмів дисипації. В умовах динамічного контактного навантаження розвиток цих процесів, з одного боку, зменшує рівень нагромадженої внутрішньої енергії трибосистем, з другої, відповідає за кінетику утворення та руйнування захисних оксидних плівок і напружено-деформований стан поверхневих шарів у зоні фрикційного контакту.

На підставі енергетичного підходу та уявлень про структурно-реологічні механізми дисипації енергії можна сформулювати ряд принципів підвищення зносостійкості елементів трибосистем:

1. Мінімізація підведеної до трибосистеми механічної енергії. Цей принцип передбачає насамперед, зменшення фрикційного навантаження трибосистеми. Найпростішим технологічним способом реалізації цього принципу є створення мастиломістких поверхонь, здатних утримувати мастильний матеріал в зоні фрикційного контакту і забезпечувати ефективну регенерацію межових мастильних шарів.

Для трибосистем, що працюють в умовах тертя без мащення, як спосіб реалізації цього принципу може бути застосування матеріалів, які в результаті трибохімічних реакцій здатні утворювати оксидні плівки або плівки інших хімічних сполук з низьким опором зсуву, або створення захисних покриттів з високим антифрикційними властивостями і зносостійкістю. Технологічно такі покриття можуть бути створені, наприклад, методами газотермічного напылення із порошкових композицій, до складу яких входять метали, тугоплавкі сполуки і тверді мастильні матеріали такі, як графіт, нітрид бору BN, дисульфід молібдену MoS_2 , втористий кальцій CaF_2 [80].

2. Застосування у вузлах тертя матеріалів з високою релаксаційною здатністю. Реалізуючи цей принцип, необхідно враховуючи, що різні матеріали за різних температурно-силових режимів фрикційної взаємодії можуть проявляти різний рівень внутрішнього тертя, а отже, і різну здатність до розсіювання підведеної механічної енергії і релаксації динамічних напружень. Матеріали з високим внутрішнім тертям в умовах дії динамічних контактних навантажень (наприклад, в умовах фретингу), як правило, мають більш високу зносостійкість [57; 81]. Разом з цим не всі механізми внутрішнього тертя можна розглядати як фактор реологічного забезпечення зносостійкості. Так, найбільша інтенсивність дисипації механічної енергії (тепловиділення) забезпечується механізмом мікропластичного внутрішнього тертя. Водночас через розмноження і незворотне переміщення дислокацій в процесі циклічної мікропластичної деформації в зонах фрикційного контакту будуть нагромаджуватися втомні пошкодження. Тобто з реологічної точки зору висока зносостійкість може досягатися, коли матеріал поєднує високу релаксаційну здатність, яка забезпечується зворот-

тніми непошкоджувальними механізмами внутрішнього тертя, і достатній запас мікропластичності. У випадку зворотності діючих механізмів дисипації, до яких належить більшість механізмів гістерезисного і релаксаційного внутрішнього тертя, у більш віддалених від зон фактичного контакту об'ємах матеріалу не відбувається нагромадження деформацій, а енергія коливань ефективно розсіюється, перетворюючись у тепло. Наявність у матеріалі запасу мікропластичності забезпечуватиме релаксацію динамічних напружень у найбільш навантажених зонах фрикційного контакту в режимі стабільної або слабозгасальної релаксаційної здатності [67].

3. Оптимальне поєднання релаксаційної здатності і енергії руйнування. Аналіз рівняння (6.1) показує, що зносостійкий матеріал одночасно повинен мати і високу релаксаційну здатність, і високий критичний рівень енергії руйнування. Не розсіяна в процесі зовнішнього тертя механічна енергія нагромаджується в поверхневому шарі матеріалу і з досягненням критичної для даного матеріалу величини нагромадженої внутрішньої енергії починається розвиток актів поверхневого руйнування.

Найбільш ефективно цей принцип можна реалізувати в композиційних структурах на металевій основі, зміцненій високомодульними твердими фазами тугоплавких сполук перехідних металів. Такі сполуки мають високу енергоємність і здатні при механічних навантаженнях поглинати значну енергію [78; 82], що в поєднанні з пластичністю і релаксаційною здатністю металевої матриці буде збільшувати критичну енергію руйнування і одночасно забезпечувати ефективне розсіювання підвищеної механічної енергії. Створення матеріалів і захисних покриттів композиційної структури натеper розглядається як один із перспективних напрямів триботехнічного матеріалознавства.

4. Регулювання напружено-деформованого стану фрикційного контакту композиційних структур. Цей принцип хоча безпосередньо і не ґрунтується на структурно-реологічних принципах керування зносостійкістю, але доповнює їх у частині зниження загальної навантаженості фрикційного контакту композиційних структур.

Одна із проблем ефективного використання функціональних можливостей композиційних структур для вирішення триботехнічних завдань викликана тим, що внаслідок різних значень фізико-

механічних характеристик, таких, як модуль пружності, теплоємність, теплопровідність, коефіцієнт лінійного розширення, у перехідній зоні між матрицею та включеннями зміцнювальної фази можуть виникати значні додаткові напруження. Величина і розподіл таких напружень підлягають регулюванню і за правильного вибору співвідношення властивостей та об'ємної концентрації складових композиту можуть бути мінімізовані [83].

5. Створення термодинамічно-нерівноважних метастабільних структур. Цей принцип ґрунтується на тому, що метастабільні структури, такі як, наприклад, пересичені тверді розчини металевих сплавів, одержані під час гартування або за великої швидкості кристалізації, будучи в термодинамічному нестійкому стані, здатні ефективно розсіювати енергію тертя по механізму структурної релаксації. Важливий факт підтримання стабільності триботехнічних характеристик – забезпечення таких умов, щоб процеси структурної релаксації мали зворотний характер або відбувалися в режимі слабкої структурної релаксації.

6.2. Аналіз перспективних технологій поверхневого зміцнення і відновлення типових деталей вузлів тертя авіаційних конструкцій

У процесі розроблення конструктивно-технологічних заходів, спрямованих на підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей вузлів тертя АТ, і проектування технологічних процесів відновлення зношених деталей під час ремонту особлива увага приділяється найбільш відповідальним, важконавантаженим деталям, а також деталям обмеженого ресурсу, відбракування яких істотно підвищує вартість ремонту.

У конструкціях ПС і АД основну групу таких деталей, як свідчать результати статистичного аналізу, становлять деталі, що зношуються внаслідок фретинг-корозії за відносних переміщень у малорухомих та номінально-нерухомих вузлах і з'єднаннях. У таких вузлах навіть попередньо змащені поверхні можуть швидко переходити в режим тертя без мастильного матеріалу. Але в більшості випадків вони належать до вузлів, у яких мащення не передбачається. За функціональним призначенням і конструктивно-технологічними ознаками багато з таких деталей є типовими конструктивними елементами ПС і АД.

Класичним прикладом деталей, що зношуються внаслідок розвитку фретинг-корозії, є деталі шарнірно-болтових з'єднань шасі. Основні елементи шарнірно-болтових з'єднань – осі, болти – виготовляють із високоміцної конструкційної сталі 30ХГСНА, а їх робочі поверхні для підвищення зносостійкості і захисту від корозії піддають електролітичному хромуванню з товщиною хромового покриття 50 ... 80 мкм. Незважаючи на високу твердість і зносостійкість електролітичних хромових покриттів, як показують результати дефектації цих деталей під час ремонту, не рідко спостерігається значний знос і пошкодження їх робочих поверхонь у місцях контакту (рис 5.20). Причиною пошкодження в цьому випадку є недостатня здатність електролітичних хромових покриттів чинити опір в умовах фретинг-корозії динамічним контактним навантаженням, що зумовлено їх відносно високою крихкістю.

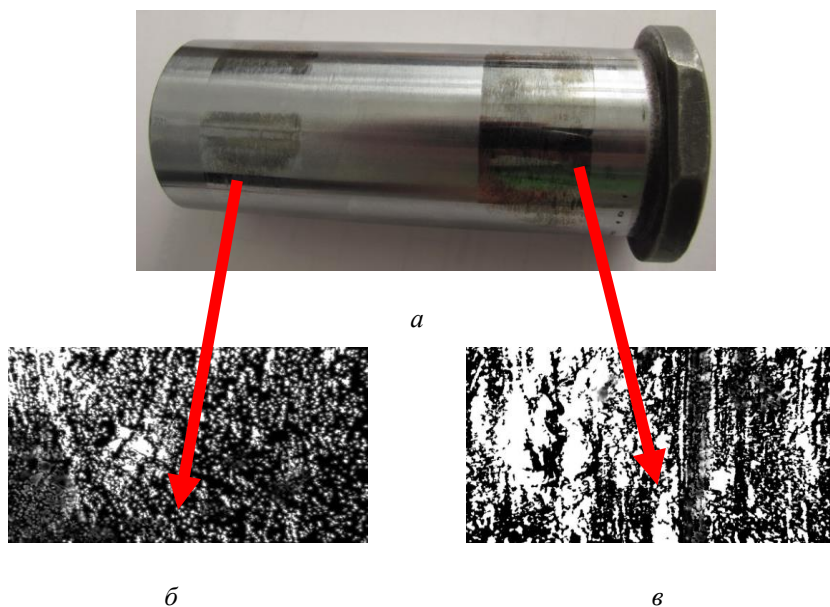


Рис. 5.20. Загальний вигляд (а) і топографія поверхні (б, в – 32) елемента шарнірно-болтового з'єднання шасі одного із ПС у місцях пошкодження фретинг-корозією

Аналіз дефектів деталей шарнірно-болтових з'єднань шасі ПС показав, що величина зносу їх робочих поверхонь може досягати 0, 3 ... 0, 5 мм [70].

Застосування такого методу поверхневого зміцнення, як алмазне вигладжування, а також створення технології одержання товстошарових хромових покриттів дозволяють підвищити опір зношуванню хромованих поверхонь і збільшити ремонтні допуски на відновлення деталей електролітичним хромуванням. Істотним недоліком такої технології є зниження характеристик міцності деталей. Особливо помітно знижується втомна міцність схильних до корозійного розтріскування високоміцних сталей, із яких виготовляється більшість важконавантажених конструктивних елементів ПС.

Зниження втомної міцності хромованих сталей пов'язують із наводненням, утворенням у поверхневому шарі деталі залишкових розтяжних напружень, а також низькою міцністю і малою пластичністю самого хромового покриття. У зв'язку з цим під час ремонту АТ уведено обмеження на кількість перехромувань деталей.

Як альтернативні електролітичному хрому для підвищення зносостійкості і відновлення деталей шарнірно-болтових з'єднань можуть бути композиційні матричнонаповнені електролітичні покриття – КЕП [84]. Структура таких покриттів являє собою відносно м'яку металеву матрицю із включенням частинок твердої зміцнювальної фази, що забезпечує їм високу зносостійкість. Додаткове легування матриці, регулювання дисперсності і вмісту зміцнювальної фази, пошарове нанесення та наступне лазерне оброблення дозволяють одержувати покриття з широким спектром фізико-механічних властивостей, створювати сприятливий градієнт міцності по товщині покриття і керувати його напружено-деформованим станом [85]. У процесі електроосадження до складу КЕП можуть бути також введені твердомастильні компоненти, що сприятимуть підвищенню їх триботехнічних характеристик. Проте практичне застосування таких покриттів натеper обмежується через відсутність даних про їх фретингостійкість і вплив на втомну міцність конструкційних сплавів.

Серед деталей вузлів тертя системи механізації крила літаків характерним дефектом є знос опорної поверхні рейок випускання-

вбирання закрилків і передкрилків у місцях контакту з роликами каретки (рис. 5.21).

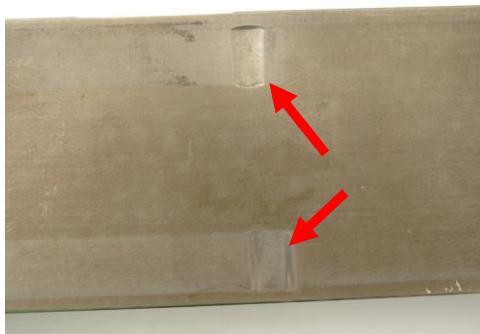


Рис. 5.21. Спрацювання опорної поверхні рейки системи механізації крила літака в місцях контакту з роликами каретки

Аналіз місць розташування зношених ділянок, умов фрикційно-контактної взаємодії деталей, характеру дефектів дозволив виявити, що рейки зношуються у місцях, які відповідають крайнім точкам контакту при випущеному і прибраному положеннях закрилків (передкрилків) і за своїми ознаками відповідають зношуванню в умовах тертя кочення з проковзуванням та фреттинг-корозії. За збільшених попередньо встановлених зазорів, а також їх збільшення в результаті зношування у спряженнях «рейка-ролик» виникають додаткові динамічні контактні навантаження удару з проковзуванням.

На різних типах літаків рейки механізації крила виготовляють із високоміцних титанових сплавів і сталей. Робочі поверхні сталевих рейок електролітично хромуються. Ураховуючи значну технологічну складність таких деталей і відповідно їх високу вартість, розроблення технологічних процесів поверхневого зміцнення та відновлення рейок під час ремонту на сьогодні є актуальним завданням.

Результати досліджень [86; 87] показали, що ефективним технологічним методом відновлення рейок системи механізації крила з титанового сплаву ВТ22 може бути детонаційне і плазмове напилювання покриттів із зносостійких композиційних матеріалів, а також молібдену. Така технологія забезпечує можливість

відновлення локальних ділянок зносу робочих поверхонь рейок з одночасним підвищенням їх зносостійкості.

У конструкціях авіаційних ГТД найбільш масовими за кількістю деталями, що піддаються зношуванню, є робочі лопатки компресора (вентилятора) і лопатки напрямного апарата компресора. На сучасних ГТД такі лопатки виготовляють із титанових сплавів. Вібраційний характер діючих навантажень зумовлює відносні циклічні переміщення і розвинення по контактних поверхнях лопаток фретинг-корозії.

Для запобігання зношуванню контактних поверхонь антивібраційних полиць робочих лопаток компресора (вентилятора) натеper на різних типах ГТД застосовують детонаційно-напилені та електроіскрові покриття із твердосплавних композиційних матеріалів на основі карбіду вольфраму. Лабораторні і стендові випробування детонаційних твердосплавних покриттів, а також аналіз їх стану на робочих поверхнях лопаток після відпрацювання міжремонтного ресурсу показали високу зносостійкість таких покриттів. Разом з цим виявився і суттєвий їх недолік – високий коефіцієнт тертя в однойменних парах і значне зниження у разі їх нанесення втомної міцності матеріалу основи.

Із збільшенням коефіцієнта тертя зростають діючі по консолях антивібраційних полиць циклічні напруження. У разі одночасного зниження втомної міцності матеріалу основи це може стати причиною виникнення втомного руйнування.

Така обставина в ряді випадків обмежує застосування твердосплавних та подібних до них за трибологічними характеристиками газотермічних покриттів для циклічно-навантажених деталей і потребує розроблення додаткових технологічних заходів, спрямованих як на підвищення їх антифрикційних властивостей, так і на зниження негативного впливу на втомну міцність матеріалу основи.

Аналіз стану контактних поверхонь антивібраційних полиць, зміцнених електроіскровим легуванням твердосплавними електродними матеріалами, показав, що, незважаючи на високу твердість і зносостійкість покриття, на значній кількості лопаток після відпрацювання міжремонтного ресурсу фіксується знос, величина якого значно перевищує товщину захисного шару. Характер топографії зношеної контактної поверхні антивібраційної полиці робочої лопатки із титанового сплаву одного із ГТД, попередньо

зміцненої електроіскровим легуванням сплавом ВКЗ, показано на рис. 5.22.



Рис. 5.22. Топографія зношеної поверхні антивібраційної полиці робочої лопатки ГТД із титанового сплаву

Значний знос поверхні в такому випадку може бути зумовлений недостатньою товщиною захисного шару покриття для забезпечення роботи трибоспряження на тривалий ресурс. Очевидно, що після зношування захисного шару в контакт вступають поверхні основного металу. Із досягненням величин зносу, за яких у спряженні втрачається натяг і утворюється зазор, процеси взаємодії контактних поверхонь антивібраційних полиць переходять від режиму тертя ковзання при циклічному вібропереміщенні до динамічного контактного навантаження в режимі удару з проковзуванням, що буде супроводжуватись більш швидким наростанням зносу.

Значні контактні навантаження і умови для розвитку фретинг-процесів виникають у замковій частині з'єднання робочих лопаток компресора (вентилятора) ГТД з диском. Особливістю роботи таких трибовузлів є високий рівень діючих напружень. У з'єднаннях типу «ластівковий хвіст» максимальна концентрація напружень виникає поблизу країв хвостовика лопатки, де в більшості випадків і спостерігається пошкодження фретинг-корозією. Такі пошкодження стають осередком утомного руйнування лопаток по замковій частині і міжпазових виступів дисків компресора ГТД [88–90]. Електролітичне сріблення і нанесення на робочу поверхню хвостовика лопатки твердомасильних покриттів на основі дисульфиду молібдену і графіту не забезпечує надійного захисту спряжених поверхонь і лише на деякий час можуть відтермінувати розвиток у спряженні фретинг-корозії.

Характерне пошкодження контактних поверхонь замкової частини робочих лопаток компресора ГТД показано на рис. 5.23.



a



б



в

Рис. 5.23. Зовнішній вигляд (*a*) і топографія поверхні хвостовика робочої лопатки компресора ГТД у місцях пошкодження фретинг-корозією (*б, в* –32)

Лопатки напрямного апарата компресора ГТД зношуються по поверхнях у місцях їх взаємного контакту і в місцях контакту лопаток з кільцями. Натепер у практиці авіабудування для підвищення зносостійкості контактних поверхонь лопаток напрямного апарата застосовують технологію електроіскрового легування твердосплавними електродними матеріалами. За допомогою електроіскрового легування також проводиться відновлення лопаток.

Для умов контактної взаємодії трибоспрямиєнь лопаток напрямного апарата електроіскрові твердосплавні покриття ВКЗ показують досить високу зносостійкість і захисну здатність. З огляду на невелику товщину захисного шару таких покриттів і тенденції до збільшення ресурсу ГТД для цих деталей потрібно розробити більш ефективні технологічні процеси поверхневого зміцнення.

Таким чином, з аналізу проблеми забезпечення зносостійкості і відновлення робочих лопаток та лопаток напрямного апарата компресора авіаційних ГТД можна зробити висновок, що ця проблема залишається актуальною як щодо створення більш ефективних матеріалів захисних покриттів, здатних забезпечити поєднання високої зносостійкості з необхідними антифрикційними властивостями, так і в напрямі розроблення технологій, спрямованих на уникнення можливих негативних впливів покриттів на інші експлуатаційні характеристики деталей, зокрема втомну міцність.

Для газотермічного напилювання перспективним методом розвитку технологій може стати створення градієнтних покриттів з високою контактною міцністю і зносостійкістю робочого поверхневого шару та оптимальним співвідношенням модулів пружності матеріалу деталі і прилеглого до деталі шару покриття. Таке поєднання властивостей дозволить уникнути додаткових перенапружень на межі «покриття – основа» і, таким чином, підвищити не тільки зносостійкість, але і втомну міцність деталі [91].

Для технологій електроіскрового легування проблему керування зносостійкістю можна вирішувати в таких напрямках:

- створення покриттів, здатних до трибоокиснення і формування на поверхнях контакту в умовах тертя нанорозмірних вторинних оксидних структур з антифрикційними властивостями. До таких матеріалів належить зокрема, композиційна кераміка на основі боридів перехідних металів [92];

- розвиток комбінованих технологій електроіскрового легування в поєднанні з лазерним обробленням і створенням дискретних та багатошарових покриттів [93; 94].

Типовими елементами деталей гарячої частини ГТД, що піддаються зношуванню, є контактні поверхні робочих лопаток турбіни.

Умови роботи робочих лопаток турбіни сучасних ГТД характеризуються широким діапазоном зміни робочих температур і високим рівнем діючих статичних та динамічних навантажень. На різних типах ГТД лопатки мають подібне конструктивне виконання. Міцність лопаток за високих температур забезпечується застосуванням для їх виготовлення жароміцних і жаростійких дисперсно-зміцнених сплавів, таких як Ж6К, ЖС6У, ЕИ437Б. Додатково лопатки піддаються алітуванню для захисту поверхні від ерозійно-корозійного впливу високотемпературних агресивних газів – продуктів згоряння авіаційного палива.

Зниження вібронавантажень на лопатки досягається за рахунок вільного установлення лопаток у диску за допомогою ялинкового замкового з'єднання і бандажування верхньої частини. Під час складання лопатки встановлюють з натягом по бандажних полицях, що є необхідною умовою для запобігання виникненню небезпечних коливань лопаток під час роботи двигуна. Одночасно вібраційний характер навантажень, що діють на лопатки, зумовлює виникнення циклічних відносних мікропереміщень контактних поверхонь у місцях бандажного та замкового з'єднань і, як наслідок, розвиток на цих поверхнях фретингового зношування.

Особливо інтенсивного зношування зазнають контактні поверхні лопаток у місцях бандажного з'єднання. Аналіз результатів статистичних досліджень, виконаних на прикладі одного з авіаційних ГТД [95], показав, що внаслідок зносу контактних поверхонь антивібраційних полиць уже під час першого ремонту 10 ... 15 % робочих лопаток турбіни із всього комплексу замінювались, а під час другого ремонту відсоток лопаток, що підлягають заміні, збільшувався вдвічі.

Традиційним методом підвищення зносостійкості і відновлення контактних поверхонь бандажних полиць робочих лопаток турбіни ГТД є наплавлення (аргонодугове, мікроплазмове, електропроменеве) з використанням як присадкового матеріалу зносостійких високотемпературних сплавів на основі Ni та Co [17; 96].

Істотним недоліком наплавлення є структурні та фазові перетворення і виникнення в зоні зварного шва значних термічних напружень, що супроводжується зміною властивостей матеріалу основи і може викликати утворення мікротріщин. Останнім часом для запобігання зношуванню і для відновлювання робочих лопаток турбіни ГТД як альтернатива наплавленню поширюється метод напаявання пластин з нагріванням у захисній атмосфері чи вакуумі [17; 97]. Застосування припоїв з температурою плавлення нижчою за температуру фазових перетворень жароміцних лопаткових сплавів і зносостійких високотемпературних матеріалів напайок дає змогу мінімізувати вплив нагрівання на матеріал основи і забезпечити високий рівень зносостійкості контактних поверхонь бандажних полиць у процесі експлуатації [97; 98]. Разом з цим уже тепер створення АД нового покоління з більш високими робочими температурними режимами експлуатації, великими міжремонтними і загальнотехнічними ресурсами потребує розроблення нових високотемпературних матеріалів, здатних ефективно протистояти зношуванню за температур до 1323 ... 1373 К.

Деталі вузлів тертя агрегатів паливно-мастильних систем, підшипників і деяких типових з'єднань авіаційних конструкцій, таких як, наприклад, зубчасті з'єднання, працюють з постійним подаванням у зону контакту рідкого мастильного матеріалу, або попереднім змащенням консистентними мастилами та періодним поповненням мастильного матеріалу під час чергового технічного обслуговування. Деталі таких вузлів мають переважно високу зносостійкість і забезпечують надійну роботу відповідних агрегатів протягом установлених ресурсів. Проте відхилення від технічних умов на складання, порушення нормальних режимів експлуатації, забруднення мастильного матеріалу можуть спричинити порушення установленого режиму мащення та, як наслідок, пришвидшення зношування деталей. Значному зношуванню за таких умов можуть піддаватися шліцьові з'єднання вал – ресор, елементи помпувальних вузлів шестеренних і плунжерних насосів, кулькових і роликів підшипників кочення.

В авіаційних конструкціях за допомогою вал – ресори передають крутний момент від ротора до редуктора в турбогвинтових двигунах, від ротора двигуна до головного редуктора гелікоптерів, від ведучої ланки двигунів до агрегатів мастильної, паливної, гідравлічної та інших систем ПС і АД. Для виготовлення

шліцевих і зубчастих деталей використовують леговані сталі марок 40ХНМА, 38ХМЮА, 12Х2НМА, 18Х2Н4ВА. Робочі поверхні деталей піддають ціануванню, азотуванню, нітроцементації для надання високої твердості і запобігання схопленню. Для компенсації можливих відхилень від розмірів і неточностей складання в зубчастій (шліцевої) парі передбачаються бокові зазори, величина яких залежить від типу і розмірів з'єднання. Залежно від умов роботи зубчастої (шліцевої) пари застосовують два способи мащення: циркуляційне – з протіканням оливи через з'єднання і разове, або періодично-відновлюване під час ТО мащення консистентними мастильними матеріалами.

Вважається, що за теоретично правильного виготовлення деталей, забезпечення геометричної точності складання і абсолютної жорсткості деталей умов для відносного переміщення в зубчастих (шліцевих) парах не існує [99; 100]. У цьому випадку матеріал шліцевих зубців повинен працювати тільки на зминання, а критерієм їх працездатності будуть напруження зминання. З огляду на високу твердість поверхневого шару матеріалу, яка досягається використовуваними для таких деталей методами хіміко-термічного оброблення, а також на зазвичай невисоке для шліцевих з'єднань погонне контактне навантаження на зубці значного зносу за таких умов контактної взаємодії і відповідно значного збільшення зазору в з'єднанні не повинно бути.

У реальних умовах унаслідок неточностей виготовлення деталей і складання зубчастих з'єднань виникає неспіввісність, що, з одного боку, погіршує умови контактування зубців (зменшується фактична площа контакту, збільшуються питомі контактні навантаження), з другого – зумовлює виникнення між контактними парами в процесі їх роботи під навантаженням відносного циклічного проковзування [99], у тому числі з розривом контакту протягом одного оберта з'єднання [100]. За таких умов фактичні контактні навантаження можуть значно перевищувати розрахункові, що в сукупності з циклічним характером ковзання призводить до інтенсивного зношування в результаті розвитку процесів фретинг-корозії. Найбільш несприятливі умови роботи зубчастих з'єднань виникають у разі розриву контакту, коли виникають додаткові ударні циклічні навантаження і порушується режим граничного мащення.

Фрагменти зношених поверхонь шліцевих зубців вал – ресори приводу одного з насосних агрегатів показано на рис. 5.24.

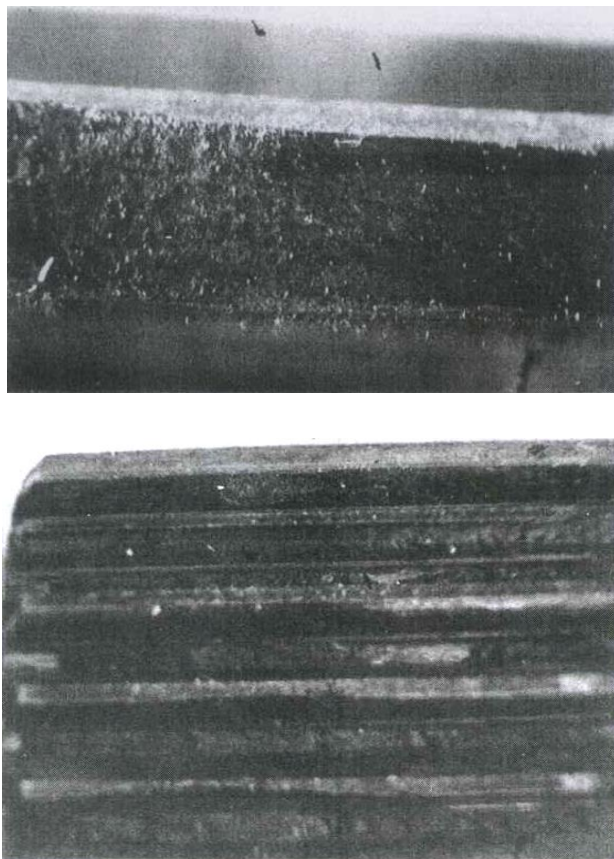


Рис. 5.24. Знос контактних поверхонь шліцевих зубців вал-ресор приводу насосного агрегата

Згідно з технічними умовами на виготовлення зубців вал – ресори азотуються на глибину азотованого шару 0,1...0,4 мм із забезпеченням твердості поверхні $HRC \geq 53$. Побудова кільцевих діаграм зносу за результатами вимірювання в середніх точках і по краях зубців показала значну нерівномірність зношування як на різних зубцях, так і по довжині одного зубця. У місцях максимального спрацювання величина зносу перевищує не тільки мінімальну, але і максимально установлену глибину азотованого шару.

Серед причин підвищеного зносу елементів трибовузлів, що працюють в умовах рідинного і граничного тертя, у тому числі зубчастих з'єднань, як одна з основних розглядається порушення встановленого режиму мащення [99]. За таких умов ефективним способом підвищення зносостійкості деталей, особливо деталей, що працюють в умовах граничного тертя, є створення спеціального мастиломісткого рельєфу поверхонь, здатного утримувати в зоні фрикційного контакту мастильний матеріал і забезпечувати регенерацію граничних мастильних шарів. Серед існуючих способів формування таких поверхонь найбільш простим і ефективним щодо практичної реалізації, може бути формування системи дискретних мікрозаглиблень за рахунок пластичного деформування [101;102]. Вибір оптимального розміщення мікрозаглиблень дозволяє конструювати поверхні з високими експлуатаційними властивостями, поліпшувати триботехнічні характеристики пар тертя, знижувати напружений стан поверхні. Особливо значного підвищення зносостійкості можна очікувати в разі поєднання такого способу з наступним хіміко-термічним обробленням.

Таким чином проблема триботехнологічного забезпечення зносостійкості та надійності авіаційних конструкцій є більш широкою і стосується не лише зазначених вище деталей. Нові перспективи в цьому напрямі окреслюють розвиток таких методів інженерії поверхні, як іонна імплантація, глибинне окисдування за допомогою мікродугових розрядів у розчинах електролітів, багатоконпонентне термодифузійне насичення в контрольованій газовій атмосфері, формування захисних зносостійких покриттів надзвуковим плазмовим і плазмово-дитонаційним напилюванням, модифікування поверхонь концентрованими потоками енергії, а також прогрес у створенні широкого класу спеціальних антифрикційних матеріалів і матеріалів захисних покриттів. Розробленню новітніх технологій і матеріалів триботехнічного призначення в останні роки присвячено велику кількість публікацій. Але більшість із таких розробок натеper перебувають на стадії науково-експериментальних досліджень і їх практичне застосування в галузі авіаційних триботехнологій потребує подальшого вивчення закономірностей формування триботехнічних властивостей поверхонь з урахуванням специфіки фрикційно-контактної взаємодії та умов експлуатації деталей авіаційних трибосистем.

6.3. Перспективні напрями розвитку технологій створення високотемпературних зносостійких матеріалів

Для вирішення завдань підвищення надійності та ресурсу особливо значення набуває забезпечення зносостійкості контактних поверхонь робочих лопаток турбіни в місцях бандажного з'єднання.

Динаміка зношування цих елементів характеризується двома режимами фрикційно-контактної взаємодії – відносним тенгенціальним циклічним мікропереміщенням у режимі фретингу за наявності у спряженні натягу і динамічним контактним навантаженням у режимі удару з проковзуванням під час роботи спряжень із зазором [17; 95]. За аналогічних умов працюють і зношуються контактні поверхні більшості номінально-нерухомих спряжень деталей гарячої частини ГТД.

Високий рівень діючих контактних навантажень, нестаціонарність температурного режиму експлуатації ставлять до матеріалів трибовузлів гарячої частини ГТД комплекс вимог, серед яких найбільш важливою є забезпечення рівнозношуваності у всьому робочому інтервалі температур [17; 103].

Натепер стосовно всієї різноманітності існуючих і особливо перспективних жароміцних матеріалів з урахуванням багатокомпонентності їх хімічного складу, фізичних принципів, покладених в основу забезпечення жароміцності та великої кількості діючих на трибосистеми зовнішніх факторів достатньо повного уявлення про механізм і перебіг процесів зношування в умовах високотемпературного фретингу не склалось. Фактор впливу температури на процеси тертя та зношування розглядається з позиції інтенсифікації деформаційних та дифузійних процесів, термічної активації реакцій триокиснення, адгезійної взаємодії, ефектів структурної і субструктурної релаксації, алотропічних, структурних та фазових перетворень поверхневих шарів матеріалу в зоні трибоконтакту [17; 62; 104].

Провідну роль у формуванні зносостійкості матеріалів за підвищених температур відіграють процеси, розвиток яких визначає утворення і стійкість оксидних плівок на поверхнях контакту.

Вважається, що за певних температур і умов віброконтактного навантаження оксидні вторинні структури, які утворюються в результаті термічно- і трибоактивованого окиснення, виконують роль екрануючого, захисного прошарку, який запобігає схопленню, знижує тертя і рівень динамічних навантажень у зонах фрикційного контакту. Триботехнічні властивості і захисна здатність оксидних плівок визначаються як самою їх природою, так і несучою здатністю когерентно зв'язаного з оксидною фазою підшарку матеріалу основи [62; 67].

Результати досліджень триботехнічних характеристик, отримані для різних груп матеріалів, – чистих металів, різного класу сталей, жароміцних сплавів, композиційних матеріалів на основі тугоплавких і інтерметалідних сполук [17; 62; 104–106], дозволили виявити характерну закономірність температурних залежностей величини фретинг-зносу. У загальному випадку для кожного конкретного матеріалу існує діапазон температур, у якому відбувається зміна механізму і характеру зношування. За температур, нижче ніжчий за цей температурний діапазон, процеси поверхневого руйнування контролюються звичайними для фретинг-корозії окисно-втомними і абразивними механізмами зношування. За таких умов підвищення температури сприяє інтенсифікації окиснення і відповідно інтенсифікації формування на поверхні трибоконтакту оксидних плівок, що, як правило, супроводжується зниженням інтенсивності зношування. За більш високих температур переважний розвиток набувають процеси адгезійно-молекулярної взаємодії і схоплення, що супроводжується локальним глибинним руйнуванням матеріалів контактних пар.

Діапазон температур зміни механізму зношування пов'язують з порушенням цілісності оксидної плівки внаслідок втрати несучої здатності матеріалу основи [62; 67]. Із практичного погляду для трибовузлів, що працюють в умовах підвищених температур, такі температури є параметром трибосистеми, що визначає перехід від допустимих масштабів поверхневого руйнування і зношування до недопустимих. Причиною руйнування оксидних плівок можуть бути також напруження, зумовлені різницею значень сталих кристалічної ґратки оксидних фаз та матеріалу основи і термічні

напруження за надмірного зростання товщини оксидної плівки [77].

Таким чином, для визначення принципів забезпечення зносостійкості матеріалів в умовах високотемпературного фретингу фізичну модель трибосистеми необхідно розглядати з позиції взаємного впливу температури та процесів фрикційно-контактної взаємодії на трансформацію структури, властивостей і механізмів розвитку поверхневого руйнування матеріалів. Температурна залежність величини зносу при цьому визначається як вихідними властивостями матеріалів контактної пари, так і набутими властивостями поверхневих шарів у результаті дії на трибосистему деформаційних, термічних і окиснювальних процесів.

Як відомо, у практиці авіаційного двигунобудування і ремонту для підвищення зносостійкості деталей гарячої частини, зокрема робочих лопаток турбіни, натеper застосовують технології аргондугового, мікроплазмового, електронно-променевого наплавлення та напаявання зносостійких високотемпературних сплавів. Виконані в останні роки дослідження з розроблення нового класу таких матеріалів дозволили створити ряд сплавів з високою температурою плавлення, здатних забезпечити тривалий ресурс роботи трибоспрямиень лопаток за температур до 1173 ... 1273 К [17; 107; 108]. В основу забезпечення жарміцності та зносостійкості таких сплавів покладено принцип композиційного, каркасного армування пластичної металевої матриці високоміцними кристалами карбідних фаз, який реалізується у структурі складноколегованих евтектичних сплавів на основі заліза і кобальту у процесі кристалізації. Найоптимальнішим поєднанням властивостей для роботи за високих температур мають складноколеговані евтектичні сплави системи Co – NbC та Co – (Ti, Nb)C (ХТН-37; ХТН-61; ХТН-62), які вже застосовуються на деяких авіаційних ГТД як матеріали для зміцнення і відновлення контактних поверхонь робочих лопаток турбіни методами аргонно-дугового наплавлення і високотемпературного припаявання пластин. Лабораторні і експлуатаційні випробування показали високу зносостійкість таких сплавів, яка в умовах високотемпературного фретингу значно перевищує зносостійкість традиційних жароміцних лопаткових сплавів та матеріалів наплавов.

У процесі створення ГТД нового покоління ставиться завдання подальшого підвищення експлуатаційних характеристик матеріалів, що застосовуються для підвищення зносостійкості трибоспрямижень робочих лопаток турбіни. Однією з основних вимог до таких матеріалів є збереження в заданому діапазоні робочих температур досить високого рівня міцності. Ця вимога передбачає вибір такого складу компонентів і принципів конструювання структури матеріалу, які були б здатні мінімізувати ефекти, пов'язані з механізмами температурного знеміцнення, і чинити опір розвитку високотемпературної пластичної деформації. Відносно невелика частка зміцнювальної карбідної фази, яка утворюється при кристалізації евтектик $\text{Co} - \text{NbC}$, $\text{Co} - (\text{Ti}; \text{Nb})\text{C}$, обмежує рівень характеристик жароміцності цих сплавів і унеможливорює подальше підвищення їх зносостійкості за рахунок створення структур із більшим співвідношенням вмісту зміцнювальної фази до матричного металу. У зв'язку з цим дослідження з розробленням матеріалів, здатних забезпечити тривалий ресурс роботи трибовузлів за високих температур, розвиваються у таких напрямках:

- пошук композиційних систем, здатних утворювати в процесі кристалізації із розплаву евтектичні структури зі збільшеним порівняно зі сплавами системи $\text{Co} - \text{NbC}$, $\text{Co} - (\text{Ti}; \text{Nb})\text{C}$ умістом зміцнювальної фази;

- створення на основі принципу дисперсійного зміцнення штучних спечених композиційних псевдосплавів;
- пошук комплексу легувальних елементів, які одночасно здатні підвищити характеристики жароміцності та жаростійкості сплаву і в результаті селективного окиснення утворювати в діапазоні робочих температур ефективні захисні оксидні плівки трибологічного призначення.

Комплексні дослідження, виконані у зазначених напрямках, дозволили розробити високотемпературні жароміцні і жаростійкі евтектичні сплави та композиційні порошкові псевдосплави триботехнічного призначення на основі системи $\text{Co} - \text{TiC}$ [109; 110]. Склад і результати оцінювання зносостійкості таких матеріалів під час випробування в умовах високотемпературного фретингу порівняно з промисловим евтектичним сплавом ХТН-62 системи Co-NbC наведено відповідно у табл. 5.5 та на рис. 5.25.

Таблиця 5.5

Склад високотемпературних зносостійких матеріалів

Склад компонентів									
№ з/п	Марка матеріалу	Масові частки, %					Масові частки/об'ємні, %		Спосіб виготовлення
		Co,	Cr,	Al,	Fe,	W,	TiC,	NbC,	
1	ХТН-62	48,25	20,0	2,0	3,0	9,5	–	17,25/19	Електродугове плавлення
2	П-69Л	55,5	19,6	2,95	2,95	–	19/30	–	Електродугове плавлення
3	П-76П	43,83	15,5	2,33	2,33	–	36/50	–	Гаряче пресування

Як видно із рис. 5.25, у досліджуваному діапазоні температур композиційні матеріали П-69Л і П-76П на основі системи Co – TiC значно перевищують за зносостійкістю сплав ХТН-62 системи Co – NbC.

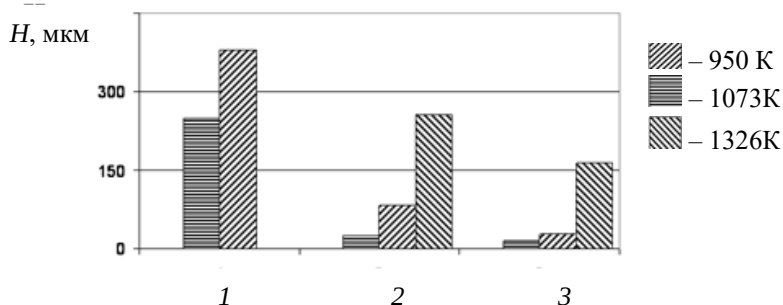
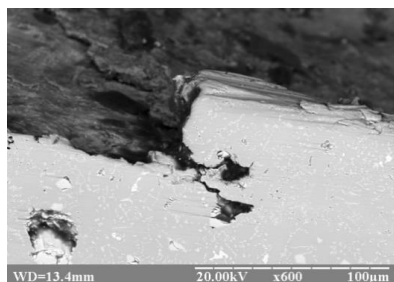


Рис. 5.25. Діаграма середнього лінійного зносу сплавів ХТН-62 (1), П-69Л (2) та П-76П (3) під час випробування на зношування в умовах високотемпературного фретингу

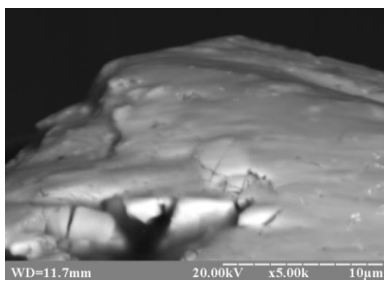
Умови віброконтактного навантаження: амплітуда відносного переміщення $A = 120$ мкм; питоме контактне навантаження $P = 30$ МПа; база випробувань $N = 5 \cdot 10^6$ циклів. Пари – однойменні.

Фрактографічний аналіз стану поверхонь тертя, а також металографічні дослідження структури приповерхневих шарів ливарних евтектичних сплавів ХТН-62 і П-69Л після випробування на зношування дозволили зробити висновок про розвиток у зоні трибоконтакту помітної пластичної деформації. Ознаки пластич-

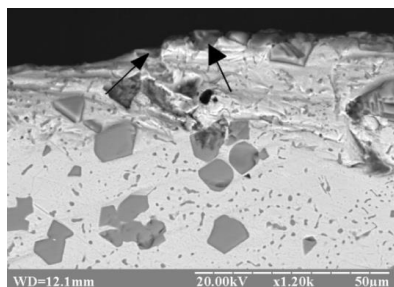
ної деформації приповерхневих шарів сплаву ХТН-62 спостерігаються уже за температури 1073 К і проявляються в утворенні деформаційного рельєфу у вигляді напливів (рис. 5.26, *а*), руйнуванні і подрібненні окремих фрагментів карбідних кристалів (рис. 5.26, *б*).



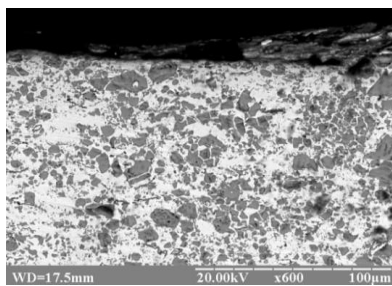
а



б



в



г

Рис. 5.26. Деформаційна структура сплавів ХТН-62 (*а, б*), П-69Л (*в*) і П-76П (*г*) у зоні трибоконтакту після випробування на зношування за температур 1073К (*а, б*) і 1323К (*в, г*)

Подібна картина розвитку деформаційних процесів у зоні трибоконтакту сплаву П-69Л спостерігається за температури 1323К (рис. 5.26, *в*).

Порівняно з ливарними евтектичними сплавами ХТН-62 і П-69Л у всьому досліджуваному діапазоні високих температур мікрорельєф поверхні і структура сформованого приповерхневого шару композиційного спеченого порошкового сплаву П-76П не містять явно виражених ознак пластичної деформації. Як видно із рис. 5.26 *г*, у приповерхневому шарі взаємне розміщення зерен

зміцнювальної карбідної фази в матриці мало відрізняється від вихідної мікроструктури матеріалу. Не виявляться також мікротріщини і викишування карбідної фази з поверхні тертя.

В умовах високотемпературного фретингу розвинення в зоні контакту значної пластичної деформації порушує цілісність захисних оксидних плівок, що супроводжується схопленням, глибинним руйнуванням і більш інтенсивним зношуванням матеріалів контактної пари. Виходячи із визначеного механізму поверхневого руйнування, підвищення зносостійкості в ряду досліджуваних матеріалів ХТН-62 → П-69Л → П-76П можна пояснити збільшенням об'ємного вмісту зміцнювальної карбідної фази. Більш високої зносостійкості ливарного евтектичного сплаву П-69Л і композиційного спеченого порошкового сплаву П-76П, порівняно зі сплавом ХТН-62, сприяє також підвищена жароміцність за рахунок більш високих характеристик високотемпературної міцності карбіду титану на відміну від карбіду ніобію, а також вилучення із їх складу такого легувального елемента, як вольфрам, який входить до складу сплаву ХТН-62. У процесі окиснення вольфраму утворюється рихлий маломіцний оксид WO_3 [77], що в умовах підвищених температур може негативно впливати на зносостійкість.

6.4. Особливості технології відновлення зношених деталей із титанових сплавів

У процесі ремонту АТ значну кількість деталей, які вибраковуються з причини надмірного зносу, складають деталі, що виготовлені із титанових сплавів [111]. Це зумовлено високою схильністю до схоплення і низькою зносостійкістю титанових сплавів в умовах тертя як в однойменних парах, так і в парі з іншими матеріалами. Як правило, такі деталі входять до складу номінально-нерухомих з'єднань, зношування яких спричиняться розвитком фретинг-корозії.

Низька теплопровідність, висока хімічна активність, чутливість до концентрації напружень, властиві сплавам на основі титану, зумовлюють специфіку технології їх відновлення порівняно з іншими конструкційними металевими сплавами.

Натепер традиційними і найбільш поширеними методами відновлення зношених деталей під час ремонту АТ є електролітичне осадження покриттів, наплавлення і газотермічне напилювання.

Стосовно відновлення деталей із титанових сплавів електролітичні методи не набули поширення через труднощі забезпечення міцного зчеплення покриття з основою і значної чутливості титанових сплавів до водневого окрихчування. Застосування методів наплавлення також обмежується необхідністю проведення процесу в атмосфері захисного газу або глибокому вакуумі і можливість окрихчування металу в зоні термічного впливу. Крім цього, через незадовільну зварюваність титанових сплавів з іншими металами як присадковий матеріал для наплавлення можуть бути використані тільки близькі за складом сплави, що не дає змоги одночасно з відновленням забезпечити зносостійкість деталі без додаткового зміцнювального поверхневого оброблення. Недоліком газотермічних методів напилювання є недостатня в ряді випадків міцність зчеплення покриттів з основою та певні обмеження товщини нарощуваного шару. Попри це технології газотермічного напилення набули значного поширення в авіаремонтному виробництві для відновлення зношених деталей.

Успішне розроблення технології відновлення деталей потребує не тільки знання технологічних особливостей методів відновлення, але і специфіки виконання окремих операцій технологічного процесу. Для відновлення зношених деталей незалежно від обраного способу першою і обов'язковою операцією технологічного процесу є попереднє механічне оброблення дефектних ділянок деталі, зокрема, видалення структурно-пошкодженого шару і виправлення геометричної форми зношених поверхонь. Для такого оброблення в авіаремонтному виробництві частіше застосовують шліфування.

Титанові сплави через високу адгезійну активність і низьку теплопровідність, незважаючи на їх відносно невисоку твердість, відрізняються низькою оброблюваністю абразивним шліфуванням [112]. Процес різання при абразивному шліфуванні титанових сплавів характеризується високим значенням сил різання, що створює великі навантаження на абразивні зерна і призводить до виникнення в зоні різання високих температур. Як наслідок підвищується знос інструменту, забезпечується значно менший, порівняно зі сталями, питомий знім металу, а також підвищується імовірність виникнення на поверхні деталі таких дефектів, як шліфувальні припалення.

Однією з основних умов, що забезпечує високу продуктивність і якість шліфування, є правильний вибір матеріалу шліфувального

інструменту. Для оброблення титанових сплавів рекомендується застосовувати шліфувальні круги із карбіду кремнію (зеленого, чорного), ельбора і синтетичних алмазів [112; 113]. Круги із карбіду кремнію на бакелітовій зв'язці за однакового рівня зносостійкості із кругами на керамічній зв'язці забезпечують високу стійкість до виникнення шліфувальних припалень і створюють у 1,3–1,5 разу менші залишкові напруження в поверхневому шарі [112]. Для шліфування ельборовими і алмазними кругами рекомендуються круги на керамічній зв'язці. Такі круги завдяки їх пористості поліпшують умови надходження в зону різання змащувально-охолоджувальної рідини, що знижує зусилля і температуру різання.

У процесі оброблення титанових сплавів шліфуванням для запобігання виникненню припалення і досягнення необхідної якості поверхні важливим є правильний вибір режимів різання. Режими різання визначають температурно-силові умови взаємодії абразиву з металом. У разі високих швидкостей різання підвищується температура і створюються умови для налипання металу на вершини абразивних зерен, що призводить до погіршення якості поверхні. За низьких швидкостей різання збільшуються механічні навантаження на абразивне зерно, що також погіршує якість поверхні і зумовлює підвищений знос інструменту.

Важливою характеристикою якості покриттів для відновлення деталей газотермічних напилюванням є міцність зчеплення (адгезія) покриття з матеріалом основи. Основні технологічні процеси, які сприяють підвищенню міцності зчеплення газотермічних покриттів на етапі підготовки поверхні деталі під напилювання, пов'язані з видаленням природних оксидних плівок, створенням шорсткого мікрорельєфу поверхні і її активації шляхом деформаційного нагартування. З'єднання покриття з матеріалом деталі відбувається за рахунок механічного зчеплення і приварювання розігрітих і розплавлених частинок напилюваного матеріалу.

У практиці газотермічного напилювання покриттів як метод підготовки поверхні деталей до напилювання значного поширення набула струминно-абразивне оброблення (САО). Технологічні рекомендації з виконання САО наводяться у спеціальних технологічних інструкціях і довідковій літературі [114; 115]. Але для кожного конкретного поєднання матеріалів деталі і покриття та способу напилювання необхідно визначити оптимальні параметри шорсткості поверхні, підготовленої до напилювання.

Під час САО одними з основних факторів, що визначають формування параметрів шорсткості мікрорельєфу поверхні, є форма і розміри абразивних частинок. Згідно з даними, отриманими у праці [116], максимальна міцність зчеплення покриттів з основою досягається за співмірності розмірів мікровиступів і мікрозаглиблень шорсткості поверхні основи з розміром частинок напилюваного матеріалу. Так, для випадку плазмового напилювання Ні-покриття на титановий сплав ОТ4-1 максимальна міцність зчеплення досягається за співвідношення параметра шорсткості поверхні (h – середня висота мікровиступів) і діаметра d напилюваного порошку $h / d = 0,75$.

У праці [117] на підставі аналізу процесів співудару і розтікання частинок напилюваного матеріалу на впадинах мікрорельєфу поверхні показано, що найбільш сприятливим для утворення міцного зв'язку покриття з основою є мікрорельєф поверхні у вигляді щільно розміщених сферичних лунок з радіусом, який перевищує радіус напилюваних частинок. Швидкість розтікання від співударяння розплавленої частинки із сферичною впадиною в декілька разів більша ніж від співударяння з плоскою поверхнею, що сприяє більш інтенсивній активації поверхні матеріалу основи. Одночасно збільшується фактична площа контакту, що активується напірним тиском, і сам напірний тиск. На підставі отриманих результатів у праці [117] для підготовки поверхні деталей до газотермічного напилювання для САО рекомендується використовувати абразивні частинки сферичної форми з приблизно однаковим діаметром, який перевищує діаметр частинок напилюваного матеріалу в 1,5–3 рази. Відносна глибина лунок, що утворюються від ударяння абразивних частинок, не повинна перевищувати 0,5.

Очевидно, що сферична форма лунок мікрорельєфу поверхні порівняно із гострим заглибленням створює меншу концентрацію напружень, що одночасно буде сприяти меншому зниженню утомної міцності. Ураховуючи високу адгезійну активність титану і значну чутливість високоміцних титанових сплавів до концентрації напружень, запропонований спосіб підготовки поверхонь [117] можна розглядати як перспективний для застосування в технологічних процесах поверхневого зміцнення і відновлення деталей із титанових сплавів методами газотермічного напилювання. Але це потребує окремого дослідження.

Для розроблення технології поверхневого зміцнення і відновлення деталей газотермічним напилюванням важливим завданням є вибір способу нанесення, матеріалу і конструкції покриття. Серед існуючих способів газотермічного напилювання в авіаремонтному виробництві для відновлення деталей із титанових сплавів найбільш широко застосовуються детонаційне і плазмове напилювання.

Детонаційне напилювання найбільш ефективно застосовують для відновлення деталей з невеликою площею дефектних поверхонь, таких як, наприклад, бандажні полиці робочих лопаток компресора (вентилятора) ГТД, локальні місця спрацювання деяких корпусних деталей, опорних поверхонь рейок механізації крила літаків і т. ін. Детонаційним напилюванням формуються найбільш щільні малопористі покриття з високою адгезійною і когезійною міцністю.

Більш універсальним і ефективним щодо продуктивності нарощування покриття є плазмове напилювання. Плазмовим методом можна відновлювати як малогабаритні з невеликою дефектною площею деталі, так і великогабаритні деталі зі значною дефектною площею. Але на відміну від детонаційних покриттів плазмові покриття мають більшу пористість, меншу адгезійну і когезійну міцність.

Газополуменеве напилювання через малу щільність і адгезійну міцність покриттів для титанових деталей в авіабудівництві і практиці ремонтного виробництва не знайшло широкого застосування.

Натепер для газотермічного напилювання розроблено досить широку номенклатуру як простих, так і складних за складом матеріалів, що дозволяє одержувати покриття із самими різними властивостями. Разом з цим у рекомендаціях щодо їх застосування зазначається лише функціональне призначення покриття (зносостійке, жаростійке, корозійностійке і т. ін.) без урахування специфіки матеріалу деталі і всього комплексу можливих вимог до експлуатаційних властивостей системи «основа – покриття».

Для роботи деталей в умовах підвищеної вологості, різних змін температури, дії циклічних навантажень важливо, щоб матеріали покриття і деталі мали близькі значення електродних потенціалів, коефіцієнтів термічного розширення, модуля пружності.

У разі великої різниці електродних потенціалів у місцях адгезійного контакту покриття і основи в умовах вологого електролітичного середовища виникає небезпека розвитку процесу елект-

рохімічної корозії. Значна різниця значень коефіцієнтів термічного розширення матеріалів покриття і основи призводить до утворення у покритті в процесі напилювання великих залишкових напружень і термічних напружень через різкі зміни температури. Аналогічний ефект виникає і за великої різниці модулів пружності матеріалів покриття і основи при дії зовнішніх навантажень. У цьому випадку в площині адгезійного контакту та шарі покриття виникають додаткові дотичні і нормальні напруження, які можуть спричиняти адгезійне і когезійне руйнування покриття [91].

Як матеріали для одержання зносостійких покриттів і відновлення деталей із титанових сплавів методом детонаційного напилювання у практиці авіадвигунобудування та ремонту АТ одним із перших застосовувались механічні порошкові суміші карбиду вольфраму з кобальтом і нікелем. Покриття із цих матеріалів вирізняються високою зносостійкістю, у тому числі для зниження зносу в умовах фретинг-корозії [114; 118]. Їх застосування дало змогу вирішити ряд практичних завдань з підвищення зносостійкості та відновлення таких відповідальних деталей, як робочі лопатки компресора для деяких типів ГТД.

Разом з тим порошкові механічні суміші WC – Co; WC – Ni не задовольняють низку вимог до формування якісних покриттів детонаційним напилюванням. Основними недоліками таких матеріалів, що негативно впливають на якість покриттів, є:

- незадовільне перетікання порошку, що зумовлює нестабільність подачі матеріалу з дозатора в газорозрядну камеру;
- сегрегація компонентів порошкової суміші в процесі напилювання через велику різницю їх питомої ваги;
- значна схильність компонентів порошкової суміші до термоокиснювальних реакцій при взаємодії з гарячим газовим потоком.

Для усунення вказаних недоліків розроблено спеціалізовані порошкові матеріали з гетерогенною структурою порошкових частинок, у яких поєднано карбідну і металеву фази. Результати оцінювання зносостійкості в умовах фретинг-корозії ряду покриттів, одержаних детонаційно-газовим напилюванням із порошкових матеріалів систем WC – Co і WC – Ni порівняно з титановим сплавом ВТ8 подано у табл. 5.6.

Покриття наносились на установках з використанням двох варіантів горючої детонаційно-газової суміші: ацетилен-кисневої і

(пропан+бутан)-кисневої. Після напилювання покриття підлягали алмазному шліфуванню.

Випробування на зношування проводились в однойменних парах за таких параметрів віброконтактного навантаження: амплітуда відносного переміщення $A = 250$ мкм; питоме контактне навантаження $P = 30$ МПа; зовнішня температура $T=293$ К; база випробувань становила від $N = 1 \cdot 10^6$ до $N = 2 \cdot 10^6$ циклів. Як показник зносостійкості взято кількість циклів фретингу, для зношування матеріалу на 1 мкм.

Як видно з отриманих результатів (табл. 5.6) за умов віброконтактного навантаження серед покриттів однієї системи (WC – Co і WC – Ni) покриття, одержані із спеціалізованих порошкових матеріалів, вирізняються більш високою зносостійкістю.

Таблиця 5.6

Результати оцінювання зносостійкості в умовах фретинг-корозії детонаційних покриттів із композиційних порошкових матеріалів на основі карбиду вольфраму

№ з/п	Марка матеріалу	Склад компонентів у матеріалі, % мас.	Метод виготовлення порошку	Варіант напилювання газово-детонаційного сумішню	Показник зносостійкості, цикл/мкм
1	BK15	85WC; 15Co	Механічна суміш	Ацетилен-кисень	$3,44 \cdot 10^5$
				Пропан+бутан-кисень	-
2	BH30	70WC; 30Ni	Механічна суміш	Ацетилен- кисень	$0,86 \cdot 10^5$
				Пропан+бутан-кисень	-
3	BK15B	85WC; 15Ni	Конгломерований	Ацетилен- кисень	$3,98 \cdot 10^5$
				Пропан+бутан-кисень	$10 \cdot 10^5$
4	BK25M	75WC; 25Co	Сфероїдезований	Ацетилен- кисень	-
				Пропан+бутан-кисень	$5,25 \cdot 10^5$
5	BH15П	85WC; 15Ni	Планований	Ацетилен- кисень	-
				Пропан+бутан-кисень	$1,16 \cdot 10^5$
6	Титановий сплав BT8				$0,15 \cdot 10^5$

Вищі значення показників зносостійкості, що отримані напилюванням з використанням як ацетилен-кисневої, так і (пропан+бутан)-кисневої дитонаційно-газової суміші, має покриття із конгломерованого порошкового матеріалу ВК15В.

Очевидно, що для такого типу покриттів існує оптимальне співвідношення карбідної фази і металу матриці, яке забезпечує найбільш високу міцність і зносостійкість. У процесі детонаційного напилювання в результаті високотемпературних реакцій між компонентами порошкового матеріалу і їх взаємодії з високотемпературним газовим потоком відбувається знеуглецювання карбіду вольфраму і зв'язування вихідних та деяких заново утворених фаз у складні карбіди і інтерметалеві сполуки [119; 120]. Так, за даними рентгенофазового аналізу [119] у покриттях, одержаних детонаційним напилюванням твердосплавних порошкових сумішей 85%мас WC + 15%мас Co(ВК15) та 80%мас WC + 20% Co (ВК20), окрім карбідної фази WC і металевої фази Co, виявлені вольфрам, карбідні фази W_2C , W_3CoC , $Co_3W_6C_4$ і інтерметалідні сполуки Co_7W_6 , Co_3W .

Закономірно очікувати, що чим менше в процесі напилювання в складі покриття зберігається високотвердої карбідної фази WC і зв'язуючого металу відносно оптимального складу композиції і чим більше утворюється менш твердих і крихких структурних складових з меншою ніж у системах WC – Co, WC – Ni міжфазовою когезійною міцністю, тим меншу зносостійкість буде мати покриття.

Фазовий склад покриття, сформованого із порошкового матеріалу ВК15В, очевидно, найбільше відповідає оптимальному співвідношенню карбідної складової і кобальтової зв'язки, що і визначає його високу зносостійкість. Вища зносостійкість покриття досягається напилюванням (пропан+бутан)-кисневою горючою дитонаційно-газовою сумішшю. Такий результат можна пояснити меншою реакційною здатністю компонентів порошкового матеріалу в продуктах детонації (пропан+бутан)-кисневої горючої газової суміші, що забезпечує менший ступінь знеуглецювання карбіду вольфраму, зменшує вміст у покритті складних вольфрамо-кобальтових карбідних фаз і інтерметалідних сполук, які істотно знижують механічні властивості детонаційно напилених карбидовольфрамкових покриттів [120].

Для плазмового напилювання зносостійких покриттів натепер апробовано велику кількість матеріалів, серед яких практичного

застосування в авіабудівництві і для відновлення зношених деталей під час ремонту набули молібден, інтерметалідний сплав ВКНА, самофлюсівні нікелеві сплави типу ПС12НВК-01, композиційні порошкові матеріали на основі карбіду хрому, карбіду титану та деякі інші.

Результати оцінювання зносостійкості в умовах фреттинг-корозії покриттів, одержаних плазовим напилюванням з використанням плакованих нікелем порошків карбіду хрому Cr_2C_3 та карбіду титану TiC , складнолегованого евтектичного сплаву на основі заліза ВТН порівнянно з титановим сплавом ВТЗ-1 наведено в табл. 5.7.

Таблиця 5.7

Результати оцінювання зносостійкості в умовах фреттинг-корозії плазових покриттів

№ з/п	Марка матеріалу	Склад компонентів у матеріалі, %мас.	Величина середнього лінійного зносу H , мкм
1	КХН-30	$70\text{Cr}_2\text{C}_3$; 30Ni	14,2
2	КТН-35	65TiC ; 35Ni	12,5
3	КТН-50	50TiC ; 50Ni	10,0
4	ВТН	Fe-(Cr; Ni; V; Ti; C; B)	7,6
5	ВТЗ-1		16,2

Випробування на зношування проводились в одноіменних парах за амплітуди відносного переміщення $A=125\text{мкм}$, питомого контактного навантаження $P=19,6\text{МПа}$, зовнішньої температури $T=293\text{К}$. База випробування становила $N=5 \cdot 10^5$ циклів.

Як видно зносостійкість покриття зростає у такій послідовності:

$\text{КХН-30} \rightarrow \text{КТН-35} \rightarrow \text{КТН-50} \rightarrow \text{ВТН}$.

Металографічні дослідження покриття КХН-30 показали, що його структура складається із карбідних зерен Cr_2C_3 , хаотично розподілених між шарами нікелю. Оскільки карбід хрому навіть за високих температур майже не розчиняється в Ni [121], зв'язок між частинками карбідної фази і Ni у покритті КХН-30 може здійснюватись переважно за рахунок механічного зчеплення.

Фазовий склад покриттів, сформованих плазовим напилюванням плакованого нікелем карбіду титану (КТН-35, КТН-50), як показали результати досліджень [122], відрізняється від складу вихід-

дно́го матеріалу. Крім TiC і Ni, у покритті наявні фази, які являють собою твердий розчин TiC у Ni, подвійний карбід (TiNi)₆C і інтерметалідні з'єднання TiNi, TiNi₃, що свідчить про взаємодію TiC і Ni у процесі формування покриття високотемпературним плазмовим струменем.

Сплав ВТН являє собою складнолегований евтектичний сплав системи Fe–(Cr; Ni; V; Ti; C; B). При евтектичній кристалізації із розплаву між компонентами сплаву утворюється потрібна евтектика, структура якої складається із твердого розчину Cr і Ni в залізі, і зміцнювальних каркасного типу кристалів TiB₂ і VC. Висока корозійна стійкість і пластичність матриці у поєднанні з високою твердістю боридної і карбідної фаз забезпечує матеріалам цього типу високу зносостійкість [123].

Розглянуті приклади детонаційних і плазмових покриттів показують, що методами газотермічного напилювання із застосуванням відповідних матеріалів, робочим поверхням деталей одночасно з відновленням може бути надана більш висока зносостійкість. Разом з цим для вибору матеріалу покриття для кожного практичного випадку застосування необхідно виходити із конкретних умов роботи трибопари. Відносно невисока адгезійно-когезійна міцність газотермічних покриттів і контактна жорсткість системи «покриття – основа» у разі перевищення деяких критичних значень параметрів фрикційно-контактного навантаження може викликати не тільки пришвидшений знос, але і розтріскування та втрату функціональної придатності покриття [118]. Галузь застосування покриття може обмежуватись також граничнодопустимою робочою температурою. Так, наприклад, максимальна робоча температура покриттів на основі карбиду вольфраму з урахуванням температури фрикційного нагрівання не повинна перевищувати температуру початку інтенсивного окиснення вольфрамівмісних фаз. Вище від цієї температури спостерігається багаторазове збільшення інтенсивності зношування, що зумовлено утворенням у зоні фрикційного контакту крихкої, мало-міцної оксидної плівки WO₃.

У деяких випадках практичне застосування зносостійких газотермічних покриттів може обмежуватись високим значенням коефіцієнта тертя. За достатньої відкритої пористості (не меншої за нижче 5 %) для зниження коефіцієнта тертя можна застосовувати просочування поверхні покриттів антифрикційними суспензіями на основі графіту, десульфиду молібдену і фторопласта. Просочу-

вання включає операції підготовки суспензії з певним умістом антифрикційних компонентів у воді, просочування і сушіння. Більш повне заповнення пористого напиленого шару суспензією забезпечує вакуумне просочування зі створенням додаткового динамічного тиску за схемою «вакуумування – розгерметизація».

Для покриттів, пористість яких менша за 5 %, зниження коефіцієнта тертя можна досягати нанесенням на поверхню спеціальних твердомастильних матеріалів, антифрикційних металевих і полімерних покриттів [124]. Як приклад, на рис. 5.27 показано залежності, які показують зміну коефіцієнта тертя дитонаційного твердосплавного покриття ВК20 після нанесення на поверхню зразків тонкого шару (~10 ... 15 мкм) твердомастильних матеріалів ЦВСП-3С (38 % мас. С, 9,6 % мас. CdO, лак КО-215 решта), електролітичного срібла, міді, електрофоретичного покриття на основі фторопласта (ЕФП) і дисульфиду молібдену (ВСП).

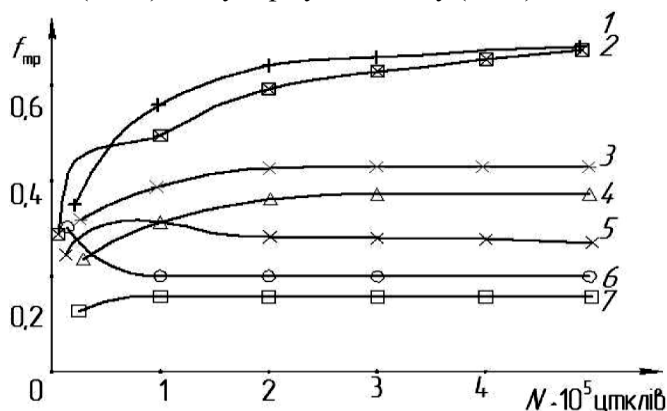


Рис. 5.27. Залежність коефіцієнта тертя від кількості циклів віброконтактного навантаження (фретингу) в умовах тертя в однойменних парах (1; 2; 5) і в парі з покриттям ВК20, підданого алмазному шліфуванню (3; 4; 6; 7): 1 – ВК20, підданого алмазному шліфуванню; 2 – ВК20, підданого алмазному шліфуванню + ЦВСП-3С; 3 – ВК20, підданого алмазному шліфуванню + сріблення; 4 – ВК20, підданого алмазному шліфуванню + міднення; 5 – ВК20, підданого алмазному шліфуванню + ВСП; 6 – ВК20, не шліфована поверхня + ЦВСП-3С; 7 – ВК20, підданого алмазному шліфуванню + ЕФП. Умови випробування: амплітуда відносного переміщення $A = 125$ мкм; питоме контактне навантаження $P = 19,6$ МПа; зовнішня температура $T = 293$ К

За підвищених величин зносу, а також у разі потреби збільшити припуски на попереднє механічне оброблення для видалення дефектного шару металу, відновлення деталей потребує нарощування товщини компенсувального шару, яке перевищує можливість детонаційного та плазмового напилювання.

Проблема відновлення таких деталей, зокрема стосовно відновлення контактних поверхонь антивібраційних полиць робочих лопаток компресора, була вирішена методом напаювання композиційного матеріалу ВТН-1 у захисній атмосфері інертного газу [125; 126]. ВПр-1 являє собою порошковий матеріал із порошку карбіду вольфраму («Реліт») і припою ВПр16 на титановій основі. При напаюванні такого композиту утворюється покриття, у якому частинки твердої карбідної фази WC міцно з'єднані у відносно пластичній металевій матриці припою. Температура нагрівання основного матеріалу для паяння не повинна перевищувати температуру поліморфного $\alpha \leftrightarrow \beta$ перетворення титанових сплавів. Перегрівання матеріалу основи призводить до росту зерна та помітного зниження його пластичності та міцності. Температура нагрівання матеріалу напайки має бути нижчою за температуру початку інтенсивної взаємодії карбіду вольфраму з розплавом припою ($\sim 1570 \dots 1590\text{K}$). Перевищення цієї температури викликає розчинення карбідної фази і, як наслідок, порушення оптимального щодо зносостійкості фазового складу покриття. Для зменшення ступеня термічного впливу на деталь паяння проводиться з місцевим нагріванням за допомогою струмів високої частоти, або з використання локальних джерел енергії [126].

На відміну від газотермічного напилювання нанесення покриття паянням із застосуванням таких матеріалів, як ВТН-1 не потребує попереднього струминно-абразивного оброблення деталі. Надійне з'єднання покриття з поверхнею деталі забезпечується утворенням міцних металевих зв'язків матеріалу зв'язки з титановим сплавом основи.

6.5. Технологічні методи підвищення втомної міцності деталей з газотермічними покриттями

У технологічних процесах виробництва і ремонту АТ для підвищення зносостійкості та відновлення зношених деталей широко застосовуються методи газотермічного напилювання покриттів.

Водночас досвід експлуатації деталей з газотермічними покриттями і виконані дослідження впливу такого виду покриттів на механічні властивості матеріалу основи показали значне зниження міцності металів [127–130]. Особливо помітно знижується опір утомному руйнуванню в умовах циклічного навантаження.

Структура газотермічних покриттів характеризується високою гетерогенністю, наявністю дефектів у вигляді пор, мікротріщин, міжфазних і міжзеренних меж із слабкими адгезійно-когезійними зв'язками. У процесі циклічного навантаження такі дефекти діють як концентратори напружень і є центрами зародження втомних тріщин [129].

Значні перенапруження можуть виникати також через утворення в покритті і на межі покриття з основою в циклі «нагрівання – охолодження» напружень розтягу та внаслідок великої різниці пружно-пластичних властивостей матеріалів покриття і основи. Окрім цього, у місцях формування адгезійних зв'язків покриття з основою в поверхневому шарі металу можуть перебудовуватися міжатомні зв'язки. Це зменшує енергетичний бар'єр, що долається дислокаціями при виході їх на поверхню.

Очевидно, що рівень зниження втомної міцності у такому випадку, буде визначатися сумарним ефектом від дії зазначених факторів, а також природою, рівнем початкової міцності і чутливістю до концентрації напружень матеріалу основи.

Зниження втомної міцності металів з газотермічними покриттями може стати причиною втомного руйнування деталей. Тому у процесі проектування технологічних процесів нанесення захисних покриттів і відновлення деталей методами газотермічного напилювання важливим є застосування технологічних заходів, спрямованих на підвищення опору втомному руйнуванню системи «покриття – основа». Особливо це актуально для вирішення завдань для багаторазового відновлення, коли з кожним наступним зніманням металу в процесі підготовки поверхні до відновлення знижується розрахункова міцність деталі, а матеріал деталі уже пройшов певні стадії нагромадження дефектів кристалічної ґратки для подальшого розвитку втомного руйнування.

Аналіз причин і механізмів зниження втомної міцності дозволив визначити деякі напрями щодо підвищення опору втомному руйнуванню металів з газотермічними покриттями [129]:

- оптимізація технологічних режимів процесу газотермічного напилювання з метою запобігання утворенню у покритті

залишкових напружень розтягу, оптимізації адгезійно-когезійних зв'язків у системі «покриття – основа», а також для неуможливлення або мінімізації несприятливих структурних та інших змін у матеріалі покриття і основи;

- оптимальне поєднання пружно-пластичних властивостей матеріалу основи і покриття для запобігання виникненню при циклічному деформуванні на межі «покриття – основа» додаткових напружень;
- створення методами поверхнево-пластичного деформування (ППД) у поверхневому шарі деталі залишкових напружень стиску, здатних ефективно гальмувати процес розповсюдження тріщин із покриття в основу.

Результати випробувань на втому зразків із титанового сплаву ВТ-8 та зразків із цього сплаву з детонаційними покриттями (ДП) ВК15 і ВН30 з різними варіантами підготовки поверхні перед напильненням подано у табл. 5.8.

Таблиця 5.8

**Результати випробувань на втому зразків із титанового сплаву
ВТ-8 з різними варіантами детонаційних покриттів
та підготовки поверхні до напильювання**

Номер варіанта	Варіанти	Границя втом- ної витривалості σ_{-1} , МПа
1	Сплав ВТ8, без покриття	500
2	Сплав ВТ8 + ДП ВК15	160
3	Сплав ВТ8 + ДП ВН30	140
4	Сплав ВТ8 + дробоструминне оброблення + ДП ВК15	440
5	Сплав ВТ8 + підшарок хім. Ni (~45мкм) + ДП ВК15	320
6	Сплав ВТ8 + підшарок хім. Ni (~45мкм) + відпал + ДП ВК15	380

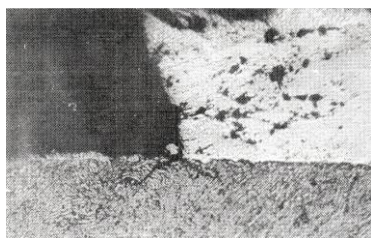
Випробування на втому проводились на циліндричних зразках в умовах згину з обертанням при симетричному циклі навантаження. Для визначення границі втомної витривалості база випробувань становила $N = 1 \cdot 10^7$ циклів.

Зразки з напиленими покриттями піддавались алмазному шліфуванню. Товщина напиленого шару покриття після шліфування становила 0,1 ... 0,15 мм, шорсткість поверхні $R_a = 0,2 \dots 0,3$ мкм.

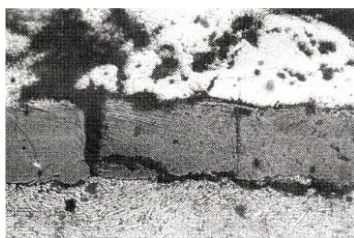
Дробоструминне зміцнювальне оброблення зразків проводилось перед напилюванням за технологією зміцнення робочих лопаток компресора ГТД. Підшарок нікелю наносився методом хімічного осаджування. Досліджувались два варіанти зразків з підшарком: без відпалювання і з відпалюванням після нанесення підшарку за температури $T = 573\text{K}$ протягом 1,5 год.

Отримані результати втомних випробувань свідчать, що застосування таких технологічних прийомів, як нанесення проміжного підшарку і попереднє зміцнення методом ППД дають змогу істотно підвищити втомну міцність металів з газотермічними покриттями.

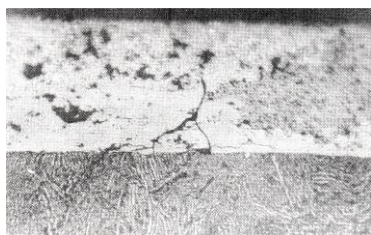
Металографічні дослідження зруйнованих зразків, підготовлених за варіантами 2 і 3 (табл. 5.8), показали, що тріщини зароджуються у покритті і з покриття розповсюджуються в основний матеріал (рис. 5.28, *a*).



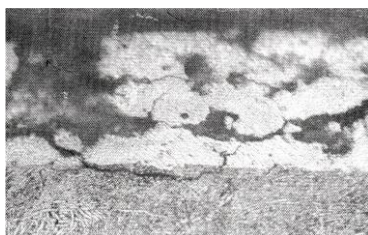
a



б



в



г

Рис. 5.28. Мікроструктура поверхневих шарів зразків після руйнування від утомленості в умовах циклічного навантаження (х400):

a – VT8 + ДП ВК15; *б* – VT8 + підшарок хім. Ni (~45мкм) + відпал + ДП ВК15; *в, г* – VT8 + дробоструминне оброблення + ДП ВК15

Підшарок нікелю (варіанти 5 і 6), очевидно, забезпечує більш плавну зміну пружно-пластичних властивостей при переході від титанового сплаву до покриття, що знижує рівень діючих на межах розділу «покриття – підшарок – основа» напружень. Крім цього, як видно із рис. 5.28, б, підшарок може бути ефективною перешкодою на шляху розвинення тріщини із покриття в основу.

Найбільший ефект з підвищення втомної міцності отримано під час попереднього дробоструминного зміцнення зразків. Такий технологічний прийом дозволив підвищити границю втомної витривалості сплаву BT8 з покриттям BK15 з 160 до 440 МПа. Підвищення опору втомному руйнуванню у процесі оброблення металів методами ППД пов'язують з утворенням в поверхневому шарі залишкових напружень стиснення і підвищенням міцності приповерхневих шарів металу за рахунок деформаційного нагартування. Для сплавів на основі титану в підвищенні опору втомному руйнуванню під час оброблення методами ППД переважну роль відіграє ефект утворення залишкових напружень стиснення [130].

Наведені у матеріалі основи у процесі ППД залишкові напруження, діючи через адгезійний контакт, будуть викликати у шарі покриття напруження такого ж знака. Тому можна очікувати, що попереднє оброблення методами ППД, створюючи у системі «покриття – основа» більш сприятливий напружений стан, одночасно гальмуватиме процес зародження і розповсюдження тріщин як у матеріалі основи, так і в покритті.

Як видно з рис. 5. 28 в, г, при втомному руйнуванні зразків, зміцнених перед напилюванням дробоструминним обробленням, тріщини, що зародились у покритті, під дією залишкових напружень стиснення, у поверхневому шарі матеріалу основи можуть гальмуватись і змінювати напрямок свого розвитку.

6.6. Прогресивні технології безрозбірного відновлення прецезійних пар тертя

Досвід експлуатації агрегатів і виконавчих механізмів паливно-мастильних і гідравлічних систем АТ свідчить, що найбільша кількість їх несправностей і відмов спричинено зношуванням і порушенням працездатності прецезійних пар тертя таких, як золотникові пари паливорегулювальних пристроїв, плунжерні і

зубчасті пари паливних, мастильних і гідронасосів. Відмітною особливістю таких пар є високі вимоги до точності виготовлення, надзвичайно малі зазори у спряженнях, які установлюють на рівні декількох мікрометрів. У зв'язку з цим до деталей прецизійних пар тертя ставлять жорсткі вимоги щодо зносостійкості їх робочих поверхонь, високої стабільності і низького значення коефіцієнта тертя.

Особливу роль у забезпеченні працездатності прецизійних пар тертя відіграє період припрацювання. У несприятливих умовах припрацювання порушується динамічна рівновага процесів утворення і руйнування вторинних захисних структур, відбувається інтенсивне зношування і зростання зазору в спряженні. Інтенсивна пластична деформація поверхонь, вільних від захисних плівок, уможливорює розвиток схоплення.

Одним із перспективних напрямів у вирішенні проблеми поліпшення умов припрацювання і створення поверхонь тертя з підвищеними триботехнічними властивостями є реалізація у вузлах тертя режиму вибіркового перенесення [131 – 133]. Сутність процесу вибіркового перенесення полягає в тому, що за певних умов фрикційно-контактної взаємодії та поєднання металів у парі тертя при взаємодії з мастильним середовищем відбувається вибіркове розчинення поверхневого шару одного із металів. У результаті перенесення іонів розчиненого металу поверхня контртіла покривається тонкою захисною плівкою, яка отримала назву «сервовитної» [133].

Процес вибіркового перенесення найефективніше реалізується в парах бронза-сталь в умовах тертя в середовищі гліцерину. Механізм утворення сервовитної плівки у цьому випадку включає такі етапи. У перший період роботи пари тертя відбувається анодне розчинення бронзи з переходом легувальних елементів таких, як олово, цинк, залізо, алюміній в мастильний матеріал – гліцерин, який діє як слабка кислота. У результаті цього поверхня бронзи збагачується міддю. Подальше деформування бронзи під дією сили тертя зумовлює новий дифузійний потік атомів легувальних елементів до поверхні, які теж переходять у мастильний матеріал. Таким чином, поверхневий шар бронзи поступово звільняється від легувальних елементів і на ньому утворюється тонка плівка чистої міді.

Оскільки гліцерин є відновником оксидів міді, поверхня мідної плівки в процесі тертя не окиснюється. Мідь, вільна від оксидних плівок, за рахунок своєї пластичної і адгезійної активності схоплюється із поверхнею сталевого контртіла, у результаті чого сталь поступово покривається тонким шаром міді, а товщина шару мідної плівки на бронзовій поверхні при цьому зменшується, що стимулює подальше розчинення бронзи. Такий процес продовжується доти, доки на сталевій і бронзовій поверхнях не утвориться шар міді завтовшки 1 ... 2 мкм. У цьому випадку молекули гліцерину уже не можуть взаємодіяти з бронзою, процес розчинення бронзи припиняється і настає сталий режим вибіркового перенесення.

Результати дослідження структури сервовитної плівки дали можливість припустити, що матеріал плівки перебуває у стані, близькому до розплаву [133]. Така плівка здатна до багаторазового передеформування без наклепу, має малі зусилля зсуву, позбавлена поверхневих оксидних плівок, здатна до схоплення і багаторазового перенесення її частинок з однієї поверхні тертя на іншу без утворення пошкоджень і збільшення сил тертя. Завдяки цьому реалізація ефекту вибіркового перенесення розглядається як один із шляхів поліпшення припрацювання і підвищення зносостійкості деталей вузлів тертя.

Як один із методів підвищення експлуатаційних властивостей деталей, у тому числі таких, що працюють у з'єднаннях з малими зазорами, використовуються методи фінішного антифрикційного безабразивного оброблення (ФАБО) [134]. Під ФАБО розуміють різні способи фінішного оброблення, що ґрунтуються на використанні в процесі тертя явища схоплення поверхонь і вибіркового перенесення. У результаті поверхня деталі покривається тонким шаром перенесеного металу: латуні, бронзи або міді. Фінішне антифрикційне безабразивне оброблення застосовують для зниження інтенсивності зношування, підвищення задиростійкості та інтенсифікації утворення захисних плівок у період припрацювання після виготовлення або відновлення деталей.

Реалізації ефекту вибіркового перенесення і формування антифрикційного покриття у процесі ФАБО сприяє уведення в зону контакту спеціального технологічного середовища, яке змочує оброблювану поверхню, розпушує оксидну плівку, пластифікує поверхню мідьумістного оброблювального інструменту і поліп-

шує схоплення металів. За таких умов забезпечується утворення суцільного міцно зчепленого покриття. Простота і технологічність способу ФАБО визначає можливість його практичного застосування для підвищення триботехнічних характеристик деталей, що працюють в умовах тертя [134].

Новим напрямом у забезпеченні надійності та довговічності трибомеханічних систем є технології, які дозволяють безрозбірно, без заміни чи відновлення деталей традиційними методами відновлювати зноси з одночасним підвищенням ресурсу і експлуатаційних характеристик пар тертя.

Серед безрозбірних технологій відновлення поширення набули технології, що ґрунтуються на використанні фрикційно-регенеруючих сумішей і матеріалів ревіталізаторів [135]. Будучи введеними у вузол тертя, такі матеріали здатні формувати захисні металоплакувальні покриття. Причому найбільш активно таке покриття формується у місцях найбільшого зносу. За рахунок приросту товщини покриття геометрія зношених деталей повністю відновлюється, чим забезпечується відновлення експлуатаційних характеристик відповідного вузла чи агрегата.

На основі застосування трибоелектрохімічних процесів розроблено енергорепараційний підхід до регенерації елементів трибосистем [136], який дозволяє відновлювати деталі безпосередньо у процесі тертя. Принцип енергорепарації полягає в тому, що у вузол тертя поміщають електрично ізольовані від деталей пари тертя вставки-електроди, які є донорами для постачання металу. До робочих поверхонь деталей і вставки підводять електричний струм так, щоб робочі поверхні були катодом, а розчинні в мастилі під дією електричного струму вставки – анодом. Іони металу розчиненого анода переносяться і осаджуються на активних поверхнях тертя. Поступове зростання товщини шару перенесеного металу забезпечує компенсацію попереднього зносу у трибонтакті. Як окремий напрям розвитку безрозбірної технології відновлення деталей трибосистем розглядаються також способи направленого масоперенесення за участю магнітного поля [137].

Безрозбірні технології відновлення з використанням енергії електричного і магнітного полів особливо перспективні для відновлення прецизійних пар тертя агрегатів паливно-мастильних і гідравлічних систем, для яких значення граничнодопустимого зносу не перевищують декількох мікрометрів. Ремонт таких пре-

цизійних агрегатів виконується в основному заміною зношених деталей, що зумовлює високу вартість їх ремонту. Практичне використання технологій енергоремонтації потребує детального вивчення механізмів і закономірностей формування шарів фрикційного перенесення, фізико-хімічних процесів, що перебігають на поверхнях тертя під впливом електричного та магнітного полів.

СЛОВНИК ТЕРМІНІВ

Абляція – процес руйнування матеріалів під дією високотемпературних і швидкісних газових потоків і який характеризується інтенсивним розігрівом матеріалу і термоерозійно-механічним винесенням його маси (зносом), зумовленим плавленням, випаровуванням, сублімацією та іншими явищами.

Абразивне зношування – механічне зношування матеріалів у результаті різальної або дряпаючої дії твердих тіл або частинок, що перебувають у закріпленому або вільному стані.

Абразивні матеріали – кристалічні зернисті або порошкові матеріали високої твердості, які використовуються для оброблення поверхонь різанням за одночасної дії великої кількості абразивних зерен з випадково орієнтованими гранями, що знімають дуже дрібну стружку. У вузлах тертя роль абразивного матеріалу можуть відігравати частки відокремленого з поверхні і зміцненого матеріалу та оксиди, які утворюють продукти зношування.

Адгезія – утворення атомного або молекулярного зв'язку між поверхнями твердих чи рідких тіл, що перебувають у контакті.

Адгезійна взаємодія – виникнення фрикційного зв'язку між плівками на поверхнях контактної взаємодії за чітко вираженої межі поділу дотичних сил.

Адсорбція – поглинання речовин (адсорбатів), що містяться в газах або рідинах, яке відбувається на поверхні твердих тіл (адсорбентів).

Анізотропія – відмінність властивостей матеріалів або середовища в різних напрямках. Анізотропійні властивості, наприклад, мають твердомастильні матеріали шаруватої структури (графіт, дисульфід молібдену тощо).

Антифрикційність – узагальнена якісна характеристика сукупності властивостей матеріалу, що забезпечує нормальну роботу в умовах тертя.

Антифрикційні матеріали – матеріали тертя, які використовуються для роботи в несучому або напрямному вузлах тертя (підшипниках ковзання). Коефіцієнт тертя антифрикційних матеріалів становить 0,001... 0,05 за наявності змащення і 0,004...0,5 без нього.

Антифрикційні властивості – функціональні властивості матеріалів, основними із яких є зносостійкість і коефіцієнт зовнішнього тертя. Додатково антифрикційні властивості матеріалів характеризуються властивістю припрацювання, несучою здатністю матеріалу, гранично-допустимим навантаженням, температурою фрикційного нагріву тощо.

Армування – уведення (високоміцного або високомодульного) матеріала в інший матеріал з метою його зміцнення.

Безвідмовність – властивість об'єкта безперервно виконувати потрібні функції в певних умовах протягом заданого інтервалу часу чи напрацювання.

Ваговий знос – маса зношеної речовини, вилученої з одиниці номінальної площі тертя за одиницю шляху тертя.

Відмова – подія, яка полягає у втраті об'єктом здатності виконувати потрібну функцію, тобто у порушенні його працездатного стану.

Внутрішнє тертя – явище опору відносному переміщенню частин одного й того самого тіла, що зумовлено двома різними групами явищ – напруженістю і пластичною деформацією. Уявлення про внутрішнє тертя широко використовується в сучасних теоріях зовнішнього тертя та зношування матеріалів і теоріях утомного руйнування металів. Характеризує здатність твердих тіл розсіювати підведену механічну енергію та здатність релаксувати динамічні напруження в умовах циклічного навантаження.

Втомна міцність (циклічна міцність) – здатність матеріалу сприймати циклічні навантаження без руйнування. Однією із кількісних характеристик утомної міцності матеріалів є границя витривалості.

Втома – зміна стану матеріалу в результаті дії циклічно змінних у часі деформацій і напружень, яка призводить до його руйнування.

Вторинні структури – нові фази (тонкоплівковий об'єкт), що спонтанно утворюються під час тертя в результаті взаємодії поверхневих шарів твердих тіл, мастильних матеріалів і газового середовища.

Газоабразивне зношування – зношування в результаті впливу твердого тіла або частинок, що захоплюється потоком газу.

Гетерогенна структура – структура матеріалу, що складається із різних фаз, наприклад, армовані композиційні матеріали, тверді сплави тощо.

Гідроабразивне зношування – зношування в результаті впливу твердого тіла або частинок, що захоплюється потоком рідини.

Градiєнт механічних властивостей – вектор, що характеризує зміну механічних властивостей елемента пари тертя по нормалі до поверхні тертя.

Граничний стан – стан об'єкта, за якого його подальша експлуатація непристима чи недоцільна, або відновлення його працездатного стану неможливе чи недоцільне.

Граничне тертя – тертя двох твердих тіл за наявності на поверхні тертя шару мастильного матеріалу, властивості якого відрізняються від властивостей в об'ємі.

Граничні шари – шари, що виникають у результаті адсорбції полярних молекул вуглеводів на поверхні твердих тіл (металів) під впливом поля твердої фази.

Дефект (деталі) – кожна окремо взята невідповідність стану виробу вимогам нормативно-технічної і (або) конструкторської документації.

Дефекти (структури) – порушення суцільності і (або) регулярності структури матеріалу.

Довговічність – властивість об'єкта виконувати потрібні функції до переходу в граничний стан за встановленої системи технічного обслуговування і ремонту.

Дисперсно-твердіючі старіючі матеріали – сплави, властивості яких змінюються в результаті їх старіння. Застосовуються як жароміцні, жаростійкі, конструкційні матеріали і матеріали із спеціальними властивостями.

Жароміцні матеріали – матеріали, що відрізняються підвищеною міцністю за високих температур.

Жаростійкість – здатність матеріалу чинити опір хімічному руйнуванню поверхні під дією гарячого повітря або іншого газу. Характеристикою для оцінювання жаростійкості може бути стійкість матеріалу до окиснення за заданих температурних умов, яка визначається за зміною маси, віднесеної до одиниці.

Ерозійне зношування – механічне зношування в результаті впливу потоку рідини і (або) газу.

Задир – процес пошкодження поверхні тертя у вигляді широких і глибоких борозен у напрямку ковзання.

Заїдання – процес виникнення і розвитку пошкоджень поверхні тертя внаслідок схоплення і перенесення матеріалу.

Залишкові напруження (внутрішні залишкові напруження) – напруження у твердих тілах, що зберігаються в часі після усунення зовнішньої дії, яка викликає їх виникнення. Основна причина виникнення залишкових напружень – неоднорідність деформації в різних точках твердого тіла, яка може бути зумовлена не рівномірністю температур, пластичної деформації та іншими причинами.

Змащування – підведення мастильного матеріалу до поверхні тертя.

Зносостійкість – властивість матеріалу чинити опір зношуванню у певних умовах тертя. Оцінюється величиною, оберненою швидкості зношування або інтенсивності зношування.

Знос – результат зношування, визначений у встановлених одиницях (об'єму, маси, товщини тощо).

Зношування – процес руйнування і відділення матеріалу з поверхні твердого тіла і (або) нагромадження його залишкової деформації під час тертя, що виявляється в поступовому змінюванні розмірів і (або) форми тіл.

Зовнішнє тертя – явище опору відносному переміщенню, що виникає між двома тілами в зонах зіткнення поверхонь по дотичних до них, супроводжуване дисипацією енергії.

Інтенсивність зношування – відношення величини зносу до шляху, на якому відбулося зношування, або до обсягу виконаної роботи.

Інтерметаліди – хімічні сполуки металів з металами: мають індивідуальні кристалічні структури, які відрізняються від структур елементів, що їх утворюють, і мають переважно металеві зв'язки.

Кавітаційно-ерозійне зношування – складний корозійно-механічний процес, що є наслідком мікроударного впливу рідини на поверхню деталі.

Карбіди – сполуки вуглецю з більш електроодатними елементами (металами і неметалами).

Ковзання – рух двох тіл відносно одне одного, під час якого їх швидкості на загальній ділянці поверхні контактної взаємодії різні за значенням або за напрямком.

Коефіцієнт тертя – відношення сили тертя до нормальної складової зовнішніх сил, що діють на поверхнях тіл.

Композиційні матеріали (композити) – гетерофазні матеріали, окремі фази яких (матриця і наповнювач) виконують специфічні функції.

Конструкційні матеріали – матеріали, які відрізняються підвищеною конструкційною міцністю. Розрізняють конструкційні металеві матеріали (конструкційні сплави), неметалеві конструкційні матеріали (пластик, кераміка), композиційні конструкційні матеріали (метали і пластики, зміцнені волокнами) та ін.

Мащення – дія мастильного матеріалу, у результаті якого між двома поверхнями зменшується сила тертя і (або) інтенсивність зношування.

Міжкристалітна корозія – руйнування меж зерен унаслідок електрохімічної корозії металів. Викликає втрату міцності і пластичності металів, їх передчасне руйнування в конструкціях.

Мастильний матеріал – матеріал, що вводиться на поверхні тертя для зменшення сили тертя і (або) інтенсивності зношування.

Мікроструктура – структура металевих матеріалів, що досліджуються за допомогою мікроскопа. Утворюються внаслідок порушення правильності будови кристалічної ґратки.

Мікротвердість – твердість окремих структурних складових або об'ємів матеріалу. Характеризує опір матеріалу пластичному і пружному деформуванню при вдавлюванні в поверхню зразка алмазної піраміди під навантаженням не більше 4,9 Н (500 гс).

Модуль пружності (модуль Юнга) – характеристика опору матеріалу пружній деформації, що дорівнює відношенню величини напружень до величини пружної деформації.

Надійність – властивість об'єкта зберігати в часі в установленних межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати об'єктом потрібні функції в заданих режимах і умовах застосування, зберігання та транспортування.

Наклеп (деформаційне зміцнення) – зміцнення матеріалу пластичним деформуванням у разі його навантаження за границю плинності.

Оксиди – сполуки хімічних елементів з киснем.

Оксидна плівка – плівка, яке складається переважно із оксидів металу і яка утворюється під час тертя в результаті взаємодії металу з киснем повітря або мастильним матеріалом.

Питоме навантаження (у триботехніці) – тиск, що у загальному випадку дорівнює відношенню нормального складового навантаження (нормальної до поверхні тертя сили) до номінальної площі контакту, на яку воно діє.

Пітинг – будь-яке видалення або переміщення матеріалу, яке призводить до утворення на поверхні деталі заглиблень і ямок.

Плазма – у фізиці чи хімії повністю або частково іонізований газ, який може бути як квазінейтральним, так і не квазінейтральним. Термін «квазінейтральний» означає, що не зважаючи на наявність вільних зарядів (електронів і іонів), сумарний електричний заряд плазми приблизно дорівнює нулю.

Плазмове нанесення покриттів – спосіб нанесення покриттів, за якого матеріал, що наноситься, розплавляється, розпилюється і транспортується на поверхню деталі потоком плазми, яка утворюється у спеціальних пальниках – плазмотронах.

Плакування – спосіб нанесення покриттів, за якого метал або сплав наноситься переважно, термомеханічним способом. Стосовно порошкових матеріалів з покриттям термін застосовується як синонім терміна «нанесення покриттів». Плаковані порошки отримують осадженням покриттів із парогазової фази.

Поверхня тертя – поверхні тіл, що беруть участь у терті.

Поверхнева активність – здатність речовини зменшити вільну енергію поверхні поділу фаз у результаті адсорбції на ній.

Поверхнево-активні речовини (ПАВ) – речовини, що адсорбуються на поверхні фаз і мають підвищену поверхневу активність.

Повзучість – здатність матеріалу повільно і безперервно пластично деформуватись під дією постійного навантаження або механічних напружень.

Поліморфні перетворення – перехід матеріалу за певних зовнішніх умов (температури, тиску) з однієї модифікації в іншу, яка відрізняється кристалічною структурою.

Пористість – інтегральна кількісна характеристика матеріалів або покриттів, яка визначається відношенням сумарного об'єму пор до повного об'єму корисного тіла у відсотках або частках одиниці.

Пори – невід'ємний елемент структури пористих матеріалів і сипучих середовищ – несучільності в частинках поршня або об'ємі тіла.

Пошкодження – подія, яка полягає у порушенні справного стану об'єму зі збереженням його працездатності.

Працездатність – стан об'єкта, за якого він здатен виконувати задані функції, зберігаючи значення заданих параметрів у межах, установлених нормативно-технічною документацією.

Прецизійність – поняття, що застосовуються в техніці для умовного визначення підвищеної точності виготовлення деталей, або точності вимірювань.

Припрацювання – процес зміни шорсткості поверхонь тертя і фізико-механічних властивостей поверхневих шарів матеріалу в початковий період тертя, що виявляється у постійних зовнішніх умовах у зменшенні роботи тертя та інтенсивності зношування.

Присадки – речовини, що додаються в невеликих кількостях до мастильних матеріалів і спеціальних рідин для надання їм нових властивостей або зміни існуючих.

Продукти зносу – частинки матеріалу, що відокремлюються в процесі зношування.

Псевдосплави – композиційні матеріали, що складаються із двох і більше переважно металевих фаз, які металургійно не взаємодіють між собою або слабо взаємодіють.

Рідинне тертя – тертя двох твердих тіл, розділених шаром рідини, у якому виявляються її об'ємні властивості.

Релаксація напружень – зменшення напружень у пружно напруженому твердому тілі за його незмінних лінійних розмірів у напрямку діючих сил. Релаксація напружень від повзучості відрізняється тим, що за першої напруження зменшуються, а сумарна деформація залишається постійною, а за другої – деформація змінюється за сталості напружень або навантаження.

Ремонт – комплекс організаційно-технічних і технологічних робіт, які виконуються з метою усунення дефектів і відновлення працездатного стану і ресурсу виробу або його окремих складових частин.

Ремонтна технологічність – придатність виробу та його складових частин для проведення ремонтних робіт з метою відновлення його працездатності та продовження ресурсу за мінімальних матеріальних витрат і витрат часу на ремонт.

Ресурс – напрацювання об'єкта від початку його експлуатації або відновлення після ремонту до переходу в граничний стан.

Напрацювання визначається тривалістю або обсягом виконаної об'єктом роботи.

Реологія – наука про деформування і течію речовин. Розглядає процеси, пов'язані з незворотними залишковими деформаціями і течією різних в'язких та пластичних речовин, а також явища релаксація напружень.

Робота тертя – енергія, передана термодинамічною системою (фрикційною парою) навколишньому середовищу і матеріалу елементів пари тертя у разі зміни зовнішніх параметрів системи.

Сила тертя – сила опору за відносного переміщення одного тіла по поверхні іншого під дією зовнішньої сили, напрямленої по дотичній до загальної межі між цими тілами.

Справність (справний стан) – стан об'єкта, за якого він відповідає всім вимогам нормативно-технічної і (або) конструкторської документації.

Сублімація – перехід речовини із твердого безпосередньо в газоподібний стан.

Сумісність – здатність двох або декількох матеріалів виконувати спільно задані функції.

Схоплювання – місцеве з'єднання двох твердих тіл унаслідок адгезії, що відбувається у процесі тертя.

Тверді сплави – кермети, що складаються із карбідів тугоплавких металів і пластичної металевої зв'язки. Існує три основні класи твердих сплавів: карбидовольфромовані (WC-Co), титановольфромові (WC-TiC-Co), титанотантало-вольфромові (WC-TiC-TaC-Co). В окремий клас виділяють безвольфромові тверді сплави (TiC-Ni-Mo). Тверді сплави відрізняються високою твердістю, міцністю і зносостійкістю.

Текстура – переважна орієнтація елементів макроструктури і (або) мікроструктури вздовж одного або декількох напрямків.

Теорія тертя (зношування) – система уявлень про основні закономірності процесу тертя (зношування), що ґрунтується на його ідеалізації і визначенні ведучого механізму взаємодії тіл тертя.

Транскристалітне руйнування (внутрішньозеренне) – вид руйнування полікристалічного матеріалу, за якого поверхніст руйнування проходить по тілу зерна (кристалів); за характером розповсюдження тріщин таке руйнування може бути пластичним або крихким.

Тертя без мастильного матеріалу – тертя двох тіл без уведеного мастильного матеріалу будь-якого виду.

Тертя з мастильним матеріалом – тертя двох тіл за наявності на поверхні тертя введеного мастильного матеріалу будь-якого виду.

Тертя кочення – тертя руху двох тіл, під час якого їх швидкості в точках дотику однакові за величиною і напрямком.

Тертя ковзання – тертя руху двох тіл, під час якого швидкості тіл у точках дотику різні за величиною і напрямком, або за величиною, або за напрямком.

Тертя руху – тертя двох тіл, що перебувають у відносному русі.

Тертя спокою – тертя двох тіл під час мікропереміщень до переходу до відносного руху.

Технологічність конструкції – сукупність властивостей конструкції виробу, що забезпечують оптимальні витрати праці, засобів матеріалів і часу за встановлених показників якості відповідно до встановлених умов виготовлення, експлуатації та ремонту.

Технічне обслуговування – комплекс обов’язкових планомірно виконуваних робіт з підтримання працездатного або справного стану виробу під час його використання за призначенням, зберігання і транспортування

Трибологія – наука про тертя, знос і мащення та взаємодію поверхонь, що контактують під час їх взаємного переміщення.

Трибосистема – складна термодинамічна система утворена внаслідок взаємодії тіл тертя, а також проміжного середовища і частини навколишнього середовища.

Триботехніка – прикладний розділ триботехнології, який охоплює кінцеву стадію процесу створення трибоспряження (вузлів, деталей і елементів пар тертя) з урахуванням досягнень трибоматеріалознавства і триботехнології.

Триботехнічні властивості – сукупність властивостей, що характеризують матеріали тертя (антифрикційні і фрикційні). До триботехнічних властивостей належать такі функціональні властивості, як зносостійкість, здатність до припрацювання та ін.

Триботехнологія – сукупність методів і засобів, спрямованих на підвищення надійності і довговічності окремих елементів і в цілому трибосистеми (вузлів тертя).

Трибоматеріалознавство – розділ трибології, що вивчає поведінку матеріалів в умовах тертя (зміну структурно-фазового стану поверхневих шарів металів, сплавів, полімерів під дією сили тертя, температури тертя, навколишнього середовища та інших похідних від них факторів). Розробляє принципи створення триботехнічних матеріалів з високим ступенем надійності в експлуатації.

Ударна хвиля – збурення, що поширюється в речовині зі швидкістю, більшою за швидкість звука, і характеризується стрибкоподібною зміною тиску, щільності і температури речовини на фронті збурення.

Фрактографічний аналіз – метод дослідження будови зламів металів і сплавів. За допомогою фрактографії вивчають закономірності процесу руйнування, його кінетику, механізм, установлюють характер і причини експлуатаційних руйнувань.

Фретинг (фретинг-процес) – руйнування поверхонь тертя деталей машин, що проявляється у різко інтенсифікованому (динамічному) окисненні або схопленні. Відбувається в умовах тертя ковзання з малою амплітудною проковзування у разі накладання динамічного навантаження. Термін «фретинг» також використовують для визначення особливого характеру контактної взаємодії деталей спряження, що відбувається в умовах малих коливальних відносних переміщень під навантаженням.

Фретинг-знос – результат зношування спряжених тіл за умов фретингу і фретинг-корозії.

Фретинг-корозія – явище руйнування поверхонь спряжених тіл в умовах малих коливальних відносних переміщень і окиснювальної дії навколишнього середовища.

Фретинг-втома – руйнування тіл унаслідок спільної дії фретингу і циклічного зміненого об'ємного навантаження.

Фретинг-пошкодження – дефект, що виникає в результаті фретингу (фретинг-корозії).

*Словник складено на підставі термінів та визначень, поданих у ДСТУ 2823–94, ДСТУ 2860–94 [140; 141] та науково-технічних виданнях [67; 138–142].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Ипатов М. И.* Организация и планирование машиностроительного производства: учеб. для машиностр. спец. вузов / М. И. Ипатов, М. К. Захарова, К. А. Грачева и др.; под ред. М. И. Ипатова, В. И. Постникова, М. К. Захаровой. – М. : Высш. шк., 1988. – 367 с.
2. *Кудрін А. П.* Ремонт повітряних суден та авіаційних двигунів: підруч. / А. П. Кудрін, Г. М. Зайвенко, Г. А. Волосович, В. Д. Хижко. – К. : НАУ, 2002. – 492 с.
3. *Подреза С. М.* Перспективное планирование авиаремонтного производства и экономическая оценка его эффективности / С. М. Подреза, А. П. Кудрин. – К. : КМУГА, 1997. – 156 с.
4. *Кручинский Г. А.* Ремонт авиационной техники. Ч.2. Теория и практика / Г. А. Кручинский. – М. : Машиностроение, 1980. – 216 с.
5. *Черновол М. И.* Повышение качества восстановленных деталей машин / М. И. Черновол, С. Е. Поединок, Н. Е. Степанов. – К. : Техніка, 1989. – 168 с.
6. *Молодык Н. В.* Восстановление деталей машин: справ. / Н. В. Молодык, А. С. Зенкин. – М. : Машиностроение, 1989. – 480 с.
7. *Крысин В. Н.* Технологическая подготовка авиационного производства / В. Н. Крысин. – М. : Машиностроение, 1984. – 200 с.
8. *Елисеев Ю. С.* Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей / Ю. С. Елисеев, В. В. Крылов, К. А. Малиновский, В. Г. Попов. – М. : Высш. шк., 2002. – 355 с.
9. *Щеглова Г. С.* Совершенствование организации ремонтного производства на базе анализа дефектов / Г. А. Щеглова, В. М. Краснова // Перспективные методы ремонта авиационной техники: межвуз. сб. науч. тр. – К. : КИИГА, 1981. – С. 142–148.
10. *Иванова В. С.* Природа усталости металлов / В. С. Иванова, В. Ф. Терентьев. – М. : Металлургия, 1975. – 456 с.
11. *Кордонский Х. Б.* Основы статического анализа данных о неисправностях и отказах авиационной техники / Х. Б. Кордонский, Ю. А. Матринов, Б. Е. Корсанов. – Рига : РКИИГА, 1974. – 135 с.

12. *Биргер И. А.* Расчет на прочность деталей машин: справ. / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – М. : Машиностроение, 1979. – 702 с.

13. *Серенсен С. В.* Несущая способность и расчет деталей машин на прочность / С. В. Серенсен, В. В. Качаев, В. М. Шнейдерович. – М.: Машиностроение, 1975. – 160 с.

14. *Термостойкость* деталей машин / под. ред. И. А. Биргера, Б. Ф. Шорра. – М. : Машиностроение, 1975. – 455 с.

15. *Шапкин В.* Проблемы поддержания летной годности воздушных судов // *Авиапанорама*. – 2003. – № 5. – С. 24–26.

16. *Бердник В. В.* Проблеми забезпечення якості при виробництві авіаційної техніки / В. В. Бердник, В. Є. Марчук // *Труди академії*. – К. : НАУ, 2004. – №55. – С. 259–268.

17. *Богуслаев В. А.* Контактное взаимодействие сопряженных деталей ГТД / В. А. Богуслаев, Л. Й. Ивченко, А. Я. Качан, В. Ф. Мозговой. – Запорожье : Изд-во ОАО «Мотор Сич», 2009. – 328 с.

18. *Гаркунов Д. Н.* Современные проблемы триботехники / Д. Н. Гаркунов, А. А. Полянов, В. А. Семенов // *Трение и износ*. – 1980. – Т.1. – №3. – С. 393–403.

19. *Гаркунов Д. Н.* Повышение износостойкости деталей конструкций самолетов / Д. Н. Гаркунов, А. А. Полянов. – М. : Машиностроение, 1973. – 202 с.

20. *Крылов К. А.* Долговечность узлов трения самолетов / К. А. Крылов, М. Е. Хаймзон. – М. : Транспорт, 1976. – 183 с.

21. *Чернець М.* Дослідження та розрахунок трибосистем ковзання, методи підвищення довговічності і зносостійкості. Т.1. Методи прогнозування та підвищення зносостійкості триботехнічних систем ковзання: в 3т. / М. Чернець, М. Пашечко, А. Невчаз. – Дрогобич: Коло, 2001. – 492 с.

22. *Шевеля В. В.* Трибохимия и реология износостойкости / В. В. Шевеля, В. П. Олександренко. – Хмельницький: ХНУ, 2006. – 278 с.

23. *Крагельский И. В.* Трение и износ в машинах / И. В. Крагельский. – М. : Машгиз, 1962. – 384 с.

24. *Крагельский И. В.* Трение и износ / И. В. Крагельский – М. : Машиностроение, 1968. – 480 с.

25. *Костецкий Б. И.* Поверхностная прочность материалов при трении / Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, А. К. Караулов и др. – К. : Техніка, 1976. – 296 с.

26. *Ишлинский А. Ю.* Проблемы изнашивания твердых тел в аспекте механики / А. Ю. Ишлинский, И. В. Крагельский, И. М. Алексеев и др. // Трение и износ. – 1986. – Т. VII. – №4. – С. 581–592.

27. *Крагельский И. В.* Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Камбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.

28. *Костецкий Б. И.* Трение, смазка и износ в машинах / Б. И. Костецкий. – К. : Техніка, 1970. – 394 с.

29. *Suh N. P.* The Delamination Theory of Wear / Weer. – 1973. – Vol. 25. – №1. – P. 111–124.

30. *Боуден Ф. П.* Трение и смазка твердых тел / Ф. П. Боуден, Д. Тейбор. – М. : Машиностроение, 1968. – 543 с.

31. *Белый В. А.* Трение и износ материалов на основе полимеров / В. А. Белый, А. И. Свириденко, А. И. Петроковец, В. Г. Савкин. – Минск : Наука и техника, 1976. – 432 с.

32. *Федоров В. В.* Кинетика повреждаемости и разрушения материалов / В. В. Федоров. – Ташкент : ФАН, 1985. – 175 с.

33. *Ибатуллин И. Д.* Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев / И. Д. Ибатуллин. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – 287 с.

34. *Шевеля В. В.* Реология вязкоупругого фрикционного контакта / В. В. Шевеля, А. Терек // Проблеми трибології. – 2010. – №4. – С. 6–16.

35. *Крамар В. М.* Аналіз кінетики руйнування поверхневих шарів пар тертя на основі енергетичної моделі / В. М. Крамар, П. І. Мельник, М. В. Кіндрачук // Фізика і хімія твердого тіла. – 2013. – Т. 14. – №4. – С. 69 – 71.

36. *Владимиров В. И.* Проблемы физики трения и изнашивания / В. И. Владимиров // Физика износостойкости поверхностей металлов. – Л. : Физ.-тех. институт им. А. Ф. Иоффе АН СССР, 1988. – С. 8–41.

37. *Браун О. М.* Нанотрибология: механизмы трения на атомном уровне / О. М. Браун // Актуальные проблемы современного материаловедения. – К., 2008. – Т. 2. – С. 253–268.

38. *Агеев Е. П.* Неравновесная термодинамика в вопросах и ответах / Е. П. Агеев. – М. : Эдиториал УРСС, 2001. – 136с.

39. *Шевеля В. В.* Реология износостойкости и совместимости пар трения / Шевеля В. В. // Трение и износ. – 1993. – Т. 14, №1. – С. 48–62.

40. *Постников В. С.* Внутреннее трение в металлах / В. С. Постников. – М. : Металлургия, 1969. – 332 с.
41. *Трофимов В. А.* Обеспечение надежности и долговечности подвижных соединений шасси, выполненных из титановых сплавов / В. А. Трофимов, В. М. Белецкий // Технологические системы. – 2002. – №35. – С. 56–65.
42. *Кудрін А. П.* Основні види зношування деталей вузлів тертя сучасної авіаційної техніки / А. П. Кудрін, О. В. Мельник // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн.зб. – К. : НАУ-друк, 2007. – Вип. 48. – С. 24–38.
43. *Аляб'єв А. Я.* Ремонт летательных аппаратов / А. Я. Аляб'єв, Ю. М. Болдырев, В. В. Запорожец и др.; под общ. ред. Н. Л. Голего. – 2-е изд. – М. : Транспорт, 1984. – 422 с.
44. *Костецкий Б. И.* Соппротивление изнашиванию деталей машин / Б. И. Костецкий. – К. : Южное отд-ние МАШГИЗ, 1959. – 478с.
45. *Grunderg L.* The effect of Additives on the Water-Induced pitting of Ball Bearing / L. Grunderg, D. Scott // Inst. Petrol, 1960. – № 940, 46. – P. 259–266.
46. *Петрусевиц А. И.* Детали машин. Кн. I. Зубчатые передачи / А. И. Петрусевиц. – М. : Машгиз, 1953. – С. 212–356.
47. *Коросташевский Р. В.* Авиационные подшипники качения / Р. В. Коросташевский, А. М. Зайцев. – М. : Оборонгиз, 1963. – 340 с.
48. *Зайцев А. М.* К вопросу о возможности прогнозирования долговечности подшипников качения токовыхревым методом / А. М. Зайцев, К. В. Маркевич, И. Б. Тартаковский, В. В. Черняк // Труды гос. науч.-исслед. ин-та гражд.авиации. – М. : ОНТЭИ, 1972. – Вып. 76. – С. 128–135.
49. *Костецкий Б. И.* Надежность и долговечность машин / Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, Л. И. Бершадский, А. К. Караулов. – К. : Техніка, 1975. – 408 с.
50. *Маркевич К. В.* Восстановление изношенных деталей авиационной техники: конспект лекций / К. В. Маркевич, В. Г. Панамарчук. – К. : КИИГА, 1979. – 50 с.
51. *Тадольдер Ю. А.* Об изнашивании технически чистых металлов в абразивной среде: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.02.04 «Трение и износ в машинах» / Ю. А. Тадольдер. – Таллин, 1966. – 34 с.

52. *Хрущев М. М.* Исследование изнашивания металлов / М. М. Хрущев, М. А. Бабичев. – М. : Изд-во АН СССР, 1960. – 350 с.

53. *Кащеев В. Н.* Разрушение поверхности металла в зависимости от угла удара абразивной частицы / В. Н.Кащеев //ЖТФ. – 1955. ТХХV. – Вып. 13. – С. 2365–2368.

54. *Тит В. А.* Поверхностные явления при контактном взаимодействии поверхностей трения деталей топливно-гидравлических систем / В. А. Тит, В. Ф. Лабунец, А. В. Косянчук // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К. : НАУ, 2011. – Вып. 56. – С. 167–172.

55. *Багачев И. Н.* Кавитационное разрушение и кавитационностойкие сплавы / И. Н. Багачев. – М. : Металлургия, 1972. – 192 с.

56. *Стечишин М. С.* Закономерности кавитационно-ерозионного изнашивания металлов в коррозионных средах / М. С. Стечишин, А. И. Некоз, Л. И. Погодаев, А. С. Протопопов // Трение и износ. – 1990. – Т. 11. – №3. – С. 454–463.

57. *Голего Н. Л.* Фреттинг-коррозия металлов / Н. Л. Голего, А. Я. Аляб'ев, В. В. Шевеля. – К.: Техніка, 1974. – 272 с.

58. *Уотерхауз Р. Б.* Фреттинг-коррозия / Р. Б. Уотерхауз. – Л. : Машиностроение. – 272 с.

59. *Дюкет Д.* Коррозия и усталость при фреттинге // Обработка поверхности и надежность материалов / Д. Дюкет. – М. : Мир, 1985. – С. 149–161.

60. *Иванова В. С.* Усталость и хрупкость металлических материалов / В. С. Иванова. – М. : Наука, 1968. – 216 с.

61. *Иванова В. С.* Усталость металлов при контактном трении / В. С. Иванова, И. А. Одинг // Известия АН СССР: ОТН. – 1957. – Вып.1. С. 95–102.

62. *Шевеля В. В.* Фреттинг-коррозия конструкционных материалов при повышенных температурах / В. В. Шевеля, А. В. Карасьов // Трение и износ. – 1982. – Т.3 – №2. – С. 256–263.

63. *Духота О. І.* Зносостійкість матеріалів трибомеханічних систем при динамічному контактному навантаженні / О. І. Духота, Н. О. Науменко, В. І. Костючек // Проблеми тертя та зношування: наук. техн. зб. : НАУ, 2013. – Вип. 59. – С. 30–35.

64. *Артемьев В. А.* Формирование, затухание и взаимодействие ударного импульса конечной протяженности со свободной поверхностью упругопластичного тела / В. А. Артемьев, В. А. Басков,

Е. В. Палканов, Л. Е. Чернов // Весник ВГУ. Серия: Физика, математика. – 2004. – №2. – С. 103–106.

65. *Писаренко Г. С.* Вибропоглощающие свойства конструкционных сплавов: справ. // Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – К. : Наук. думка, 1971. – 375 с.

66. *Колесников Ю. В.* Механика контактного разрушения // Ю. В. Колесников, Ю. М. Морозов. – М.: Наука, 1989. – 224 с.

67. *Шевеля В. В.* Фреттинг-усталость металлов / В. В. Шевеля, Г. С. Калда. – Хмельницкий: Поділля, 1998. – 299 с.

68. *Milestone Wayne D.* Fretting and fretting fatigue in metal-to-metal contacts / D.Milestone Wayne // AIAA / ASME 11-th Struct. DynandMater. Cons. – NewYork, 1970. – P. 86–93.

69. *Шевеля В. В.* Влияние фреттинг-коррозии на циклическую прочность авиационных материалов / В. В. Шевеля, В. А. Краля, Г. С. Калда, О. Г. Липко // Проблемы эксплуатации и надежности авиационной техники: сб. науч. тр. – К. : КМУГА, 1998. – С. 17–20.

70. *Технологическая инструкция* по применению износостойких покрытий при ремонте деталей авиационной техники поврежденных фреттинг-коррозией. – М.: Воздуш. трансп. 1980. – 56 с.

71. *Демко А. А.* Тепловые явления при фреттинг-процессе / А. А. Демко, Г. Т. Сиренко, А. С. Опальчук // Надежность и долговечность машин. – 1990. – Вып. 18. – С. 94–99.

72. *Кулагин Н. С.* Фрактографические особенности и диагностические признаки усталостных изломов, инициированных фреттингом / Н. С. Кулагин, А. И. Духота, В. Л. Свечников // Перспективные методы восстановления деталей и узлов авиационной техники: сб. науч. тр. – К. : КИИГА, 1989. – С. 24–28.

73. *Школьник Л. М.* Методика усталостных испытаний: справ. / Л. М. Школьник. – М. : Металлургия, 1978. – 304 с.

74. *Черновол М. І.* Надійність сільськогосподарської техніки: підруч. – 2-ге вид. / М. І. Черновол, В. Ю. Черкук, В. В. Аулін та ін.; за заг. ред. М. І. Черновола. – Кіровоград; КАО, 2010. – 320 с.

75. *Воробьев Л. Н.* Технология машиностроения и ремонт машин. – М. : Высш. шк., 1981. – 344 с.

76. *Лубяний В. В.* Возможности и преимущества расширения эксплуатационных и ремонтных допусков на износ деталей авиационной техники / В. В. Лубяний, И. И. Ильинский, В. Д. Паламарчук // Перспективные методы восстановления деталей

и узлов авиационной техники: сб. науч. тр. – К. : КИИГА, 1989. – С. 39–42.

77. *Окисление металлов*. Т. 1. Теоретические основы / под. ред. Ж. Бенара. пер. с франц. – М. : Металлургия, 1968. – 499 с.

78. *Попов В. С.* Связь между износостойкостью и энергией разрушения упрочняющей фазы сплавов / В. С. Попов // ФХММ. – 1971. – №1. – С. 41–47.

79. *Тейбор Д.* Трение как диссипативный процесс / Д. Тейбор // Трение и износ. – 1994. – Т. 15. – №2. – С. 296–315.

80. *Туник А. Ю.* Газотермические покрытия, содержащие твердые смазки, для работы в условиях сухого трения и повышенных температур / А. Ю. Туник // Автоматическая сварка. – 2002. – №8. – С. 27–30.

81. *Шевеля В. В.* Внутренне трение как фактор износостойкости трибосистемы / В. В. Шевеля, П. В. Назаренко, А. Н. Гладченко, И. В. Шевеля // Трение и износ. – 1990. – Т. 11. – №6. – С. 979–986.

82. *Гаврилюк В. П.* Трибология литейных сплавов / В. П. Гаврилюк, Е. А. Марковский, В. И. Тихонович. – К. : Тип. журн. ДП Редакция журнала «Охрана труда»: Тип. журн. ДП. – 2007. – 428 с.

83. *Кіндрачук М. В.* Напружено-деформований стан композиційного матеріалу, навантаженого силами тертя та температурою / М. В. Кіндрачук, А. О. Корнієнко, С. Ф. Федорчук, О. В. Тісов // Проблеми трибології. – 2006. – №1. – С. 153–157.

84. *Лучка М. В.* Износостойкие диффузионно-легированные композиционные покрытия / М. В. Лучка, М. В. Киндрачук, П. И. Мельник и др. – К. : Техніка, 1993. – 143 с.

85. *Кіндрачук М. В.* Локальный характер напряженно-деформированного материала, нагруженного силами трения / М. В. Киндрачук, Ю. Я. Душек, М. В. Лучка // Порошковое металлургия. – 1994. – №9–10. – С. 56–61.

86. *Духота А. И.* Оценка эксплуатационной пригодности газотермических покрытий для восстановления деталей из сплава ВТ22, работающих в условиях виброконтактного нагружения / А. И. Духота, В. Ф. Аулов, Л. Н. Димитриенко, Н. С. Кулагин // Теория и практика газотермического нанесения покрытий: сб. науч. тр. – Т. 3. – Дмитров, 1985. – С. 84–87.

87. *Хімко А. М.* Підвищення зносостійкості деталей з титанових сплавів плазовими покриттями: автореф. дис. на здобуття наук.

ступеня канд. техн. наук: спец. 05.02.04 «Тертя та зношування в машинах» / А. М. Хімко. – К. : НАУ, 2008. – 20 с.

88. Федоренко Б. Ф. Об одном методе снижения напряженного состояния, приводящего к повреждениям фреттинг-износом хвостовика рабочей лопатки ГТД / Б. Ф. Федоренко // Трибофатика: труды 4-го Міжнар. симінару з трибофатики. – Тернопіль : Терноп. держ. техн.. ун-т ім. І. Пулія, 2002. – Т.2. – С. 270–272.

89. Богуслаев А. В. Особенности разрушения межпазовых виступов дисков из титановых сплавов компресоров ГТД при эксплуатации / А. В. Богуслаев, А. Я. Качан, Д. А. Долматов, В. А. Малютин // Технологические системы. – 2003. – №3. – С. 38–41.

90. Петухов А. Н. Усталостная прочность материалов и элементов конструкции ГТД в условиях контактной коррозии трения // Проблемы прочности / А. Н. Петухов. – 1972. – №2. – С. 99–103.

91. Долгов Н. А. Влияние модуля упругости покрытия на работоспособность системы основа-покрытие / Н. А. Долгов // Проблемы прочности. – 2002. – №2. – С. 66–71.

92. Подчерняева И. А. Электроискровое упрочнение титанового сплава ВТЗ-1 безвольфрамовой композиционной керамикой / И. А. Подчерняева, В. М. Панашенко, А. Д. Панасюк и др. // Порошковая металургія. – 2007. – №9/10. – С. 36–44.

93. Ляшенко Б. А. Упрочняющие покрытия дисперсной структуры / Б. А. Ляшенко, А. Я. Мовчанов, А. И. Долматов // Технологические системы. – 2001. – №4. – С. 17–24.

94. Подчерняева И. А. Особенности формирования и трибологического поведения износостойких ZrB₂-содержащих электроискровых и лазерно-электроискровых покрытий на титановом сплаве / А. И. Подчерняева, В. М. Панашенко, А. И. Духота и др. // Проблеми трибології. – 2012. – №4. – С. 96–101.

95. Духота А. И. Изнашивание деталей авиационной техники в условиях динамического контактного нагружения / А. И. Духота, В. Б. Сидоров, В. В. Малышкин // Проблеми експлуатації та надійності авіаційної техніки: зб. наук. пр. – К. : КМУЦА, 1998. – С. 82–84.

96. Перемилковский И. А. Восстановление наплавкой турбинных лопаток авиационных двигателей / И. А. Перемилковский, В. С. Гейченко, И. И. Фрушин // Автоматическая сварка. – 1976. – №5. – С. 54–56.

97. Жадкевич А. М. Применение восстановительных технологий для повышения ресурса газотурбинных двигателей // Автоматическая сварка / А. М. Жадкевич. – 2006. – №5. – С. 46–49.

98. Пейчев Г. И. Разработка и внедрение высокотемпературного износостойкого сплава для упрочнения бандажных полок ГТД / Г. И. Пейчев, А. К. Шурин, В. Е. Замковой и др. // Технологические системы. – 2000. – №3. – С. 58–60.

99. Хаймзон М. Е. Работоспособность авиационных зубчатых соединений / М. Е. Хаймзон, А. И. Кораблёв. – М.: Транспорт, 1983. – 176 с.

100. Ципак В. И. Распределение нагрузки и контактных давлений в эвольвентных зубчатых соединениях / В. И. Ципак // Теория механизмов и машин. – Х. : Вища шк. – 1979. – Вып. 26. – С. 60–67.

101. Пат. України. UA13762. Пристрій для утворення на плоскій поверхні тертя рельєфу заглибин, що утримують мастильні матеріали / В. Є. Марчук, І. Ф. Шульга, О. І. Шульга, О. Є. Плюскін – № u200509981; опубл. 17. 04. 2006, Бюл. №4.

102. Марчук В. Є. Захист поверхонь тертя дискретними поверхнями / В. Є. Марчук, Б. А. Ляшенко, М. В. Кіндрачук, О. І. Духота // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К. : НАУ, 2013. – Вип. 2 (61). – С. 80–87.

103. Пейчев Г. И. Износостойкие сплавы для контактных поверхностей деталей ГТД / Г. И. Пейчев, А. К. Шурин, Л. И. Ищенко и др. // Весник двигателестроения. – 2006. – №2. – С. 188–192.

104. Hirriks P. L. The Mechanism of Fretting and the Influence of Temperature / P. L. Hirriks // And Lubric and Tribol. – 1975. – Vol. 27. – №6. – Р. 209–214; 1976. – Vol. 28. – №1. – Р. 9–17.

105. Iwabuchi A. Fretting wear of Ikonel 625 at high temperature and high vacuum / A. Iwabuchi // Wear. – 1985. – №1 – 3. – Р. 163–175.

106. Жеглов О. С. Износ металлов при фреттинг-коррозии в диапазоне среднеобъемных температур 18–200°C / О. С. Жеглов // Проблемы прения и изнашивания: наук. техн. сб. – К. : Техніка, 1979. – №16. – С. 46–51.

107. Пат. України. UA8240A. Сплав на основі кобальта / А. К. Шурін, Г. П. Дмитрієва, Т. С. Черепова, Н. В. Андрійченко, Л. Й. Іщенко. – № 93006979; опубл. 29. 03. 1996, Бюл. №1.

108. Пат. України. UA39450. Сплав на основі кобальту / А. К. Шурін, Т. С. Черепова, Н. В. Андрійченко, В. Є. Замковий. – № 93003368; опубл. 25.02.209, бюл. №4.

109. *Духота О. І.* Композиційні сплави для зміцнення контактних поверхонь бандажних полиць газотурбінних двигунів / О. І. Духота, М. В. Кіндрачук, О. В. Тісов, Т. С. Черепова // Проблеми трибології. – 2010. – №4. – С. 101–104.

110. *Пат. України. UA69065.* Зносостійкий композиційний сплав на основі кобальта / Т. С. Черепова, М. В. Кіндрачук, О. І. Духота, О. В. Тісов. – № u201109497; опубл. 25. 04. 2012, Бюл. №8.

111. *Духота О. І.* Проблемні питання використання титанових сплавів у вузлах тертя авіаційної техніки / О. І. Духота, М. В. Кіндрачук, В. Ф. Лабунець // Проблеми тертя та зношування: наук. техн. зб. – К. : НАУ, 2007. – Вип. 47. – С. 197–206.

112. *Шлифование* сплавов на основе титана: метод. рекомендації / Научно-исслед. ин-т информации по машиностроению, 1977. – 28 с.

113. *Абразивная и алмазная обработка материалов:* справ. / под. ред. А. Н. Резникова. – М. : Машиностроение, 1977. – 391 с.

114. *Технологическая инструкция по применению износостойких газотермических покрытий для восстановления деталей авиатехники* / А. Я. Алабьев, В. А. Венедитов, Г. Н. Гельгар, А. И. Духота и др. – М. : Гос. НИИГА, 1983. – 56 с.

115. *Борисов Ю. С.* Газотермические покрытия из порошковых материалов: справ. / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко и др. – К. : Наук. думка, 1987. – 543 с.

116. *Голего Н. Л.* О влиянии шероховатости материала с титановой основой на прочность сцепления плазменных никелевых покрытий / Н. Л. Голего, В. Г. Панамарчук // ФХММ. – 1974. – №6. – С. 32–35.

117. *Харламов Ю. А.* Влияние микрорельефа поверхности на прочность сцепления с газотермическими покрытиями / Ю. А. Харламов, Ю. С. Борисов // Автоматическая сварка. – 2001. – №6. – С. 19–26.

118. *Ильинский И. И.* Оптимальные и граничные условия фреттигностойкости детонационных покрытий на основе карбида вольфрама / И. И. Ильинский, А. И. Духота, В. В. Сергеев // Трение и износ. – 1981. – Т. II. – №5. – С. 850–855.

119. *Алфинцева Р. А.* Структурные исследования детонационных покрытий WC-Co / Р. А. Алфинцева, В. Х. Кадыров, В. К. Федоренко // Порошковая металлургия. – 1980. – №10. – С. 24–29.

120. *Федоренко В. К.* Влияние структурного фактора порошковых материалов на прочностные и пластические свойства детонационных

покрытий типа ВК / В. К. Федоренко, Р. К. Иващенко, В. Х. Кадыров // Порошковая металлургия. – 1991. – №11. – С. 24–30.

121. *Войтович Р. Ф.* Тугоплавные соединения. Термодинамические характеристики: справ / Р. Ф. Войтович. – К. : Наук. думка, 1971. – 220 с.

122. *Китаев Ф. И.* Формирование покрытия из карбида титана, плакированного никелем и влияния режимов напильника на его структуру и свойства / Ф. И. Китаев, А. С. Намычкин, А. Г. Бакова и др. // Порошковая металлургия. – 1982. – №10. – С. 29–33.

123. *Кіндрачук М. В.* Формування зносостійких евтектичних покриттів концентрованими джерелами енергії: навч. посіб. / М. В. Кіндрачук, Ю. Г. Сухенко, В. С. Черненко. – К. : ІЗМН, 1997. – 119 с.

124. *Шарыпов А. З.* Пути снижения коэффициента трения детонационных покрытий на основе карбида вольфрама / А. З. Шарыпов, И. Л. Ильинский, В. А. Краля, А. И. Духота // Трение и износ. – 1983. – Том. IV. – №6. – С. 1099 – 1103.

125. *Братухин А. Г.* Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей / А. Г. Братухин, Г. К. Язов, Б. Е. Карасьов и др. – М.: Машиностроение, 1997. – 410 с.

126. *Неровный В. М.* Упрочнение и восстановление рабочих поверхностей титановых деталей дуговой напайкой в вакууме / В. М. Неровный, А. Я. Переметько // Сварочное производство. – 1995. – №3. – С. 3–5.

127. *Кулагин Н. С.* Применение газотермических покрытий при ремонте деталей АТ, подвергающимся статическими и циклическим нагрузкам / Н. С. Кулагин, А. И. Духота // Повышение эффективности систем и методов ремонта воздушных судов: сб. науч. тр. – М. : Воздуш. трансп., 1983. – С. 115–117.

128. *Копылов В. И.* Проявление разупрочняющего эффекта у конструкционных материалов с плазменными покрытиями / ФХММ. – 1977. – Т. 13. – №5. – С. 61–67.

129. *Духота О. І.* Технологічні аспекти забезпечення працездатності циклічно-навантажених деталей вузлів тертя з газотермічними покриттями / О. І. Духота, М. В. Кіндрачук, В. Ю. Потягов // Проблеми трибології. – 2009. – №1. – С. 113–118.

130. *Гликман Л. А.* К вопросу повышения усталостной прочности при поверхностном пластическом деформировании титанового сплава / Л. А. Гликман, Б. Г. Гуревич // Некоторые вопросы прочнос-

ти металлов: межвуз. сб. – Л. : Изд.-во Северо-запад. заоч. политехн. ин-та, 1975. – С. 30–32.

131. *Повышение износостойкости на основе избирательного переноса* / под. ред. Д. Н. Гаркунова. – М. : Машиностроение, 1977. – 215 с.

132. *Избирательный перенос в тяжело нагруженных узлах трения* / под. ред. Д. Н. Гаркунова. – М. : Машиностроение, 1984. – 264 с.

133. *Гарнунов Д. Н. Триботехника: учеб.* / Д. Н. Гарнунов. – М. : МСХА, 2001. – 616 с.

134. *Гаркунов Д. Н. Финишная антифрикционная безабразивная обработка поверхностей трения деталей* / Д. Н. Гарнунов // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2009. – №3 – 5. – С. 20–41.

135. *Джус Р. Н. Об образовании и функционировании МК покрытия, полученного с помощью ревитализантов* / Р. Н. Джус, В. Н. Стадниченко, Н. Г. Стадниченко, О. Н. Трошин // Вест. науки и техники. – Х.: ХДНТ «НТУ ХПИ». – 2004. – Вып. 1. – С. 59–84.

136. *Кравец И. А. Репаративная регенерация трибосистемы* / И. А. Кравец – Т. : Изд.-во Бережан. агротехн. ин-та, 2003. – 284 с.

137. *Пат. України. UA70877. Пристрій для дослідження поверхонь тертя в постійному рівномірному та нерівномірному магнітному полі* / М. М. Свирид, А. П. Кудрін, І. А. Кравец, Л. Б. Приймак, В. М. Бородій – № u201115161; опубл. 25.06.2012, Бюл. №14.

138. *ДСТУ 2823–94. Зносостійкість виробів. Тертя, зношування та масення. Терміни та визначення.* – К. : Держстандарт України, 1995. – 31 с.

139. *ДСТУ 2860–94. Надійність техніки. Терміни та визначення.* – К. : Держстандарт України, 1995. – 26 с.

140. *Кива Д. С. Специальные технологии и методика порошковой металлургии* / Д. С. Кива, С. А. Бычков, О. Ю. Ничипоренко, И. Т. Лавренко. – К. : КВІЦ, 2014. – 664 с.

141. *Зозуля В. Д. Словарь-справочник по трению, износу и смазке машин* / В. Д. Зозуля, Б. Д. Шведков, Д. Я. Ровенский, Э. Д. Браун. – К. : Наукова думка, 1990.

142. *Кіндрачук М. В. Трибологія* / М. В. Кіндрачук, В. Ф. Лабунець, М. І. Пашечко, Є. В. Корбут. – К. : Вид-во «НАУ-друк», 2009. – 232 с.

Навчальне видання

ОРГАНІЗАЦІЯ
ТА ТРИБОТЕХНОЛОГІЇ
АВІАРЕМОНТНОГО
ВИРОБНИЦТВА

Монографія

Автори: КУДРІН Анатолій Павлович,
ДУХОТА Олександр Іванович,
КІНДРАЧУК Мирослав Васильович,
ЗАЙВЕНКО Григорій Максимович

Коректор *Р. М. Шульженко*
Технічний редактор *А. І. Лавринович*
Комп'ютерна верстка *Н. С. Ахроменко*

Підп. до друку 0.04.2015. Формат 60х84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. друк. арк. 12,32. Обл.-вид. арк. 13,25.
Тираж 100 пр. Замовлення № -1.

Видавець і виготівник
Національний авіаційний університет
03680. Київ-58, проспект Космонавта Комарова, 1

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002