

УДК 621.891

- Комочкін М. С. провідний інженер-конструктор ТОВ «Пульсар Експо Україна», м. Київ, Україна, e-mail: 011079n@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1838-5442
- Циганов В. В. д-р техн. наук, доцент, професор кафедри металорізальні верстати і інструменти Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: tsyganov705@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5682-7005
- Сахнюк Н. В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри технології авіаційних двигунів Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: nat76sah@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2664-2602
- Лазарева О. О. ст. викладач кафедри технології авіаційних двигунів Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: lazarevaolha@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3417-6309
- Кривих Ю. І. ст. викладач кафедри технології авіаційних двигунів Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: juliya.krivikh@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3183-8776

## ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНОШУВАННЯ БАНДАЖНИХ ПОЛИЦЬ РОБОЧИХ ЛОПАТОК ГТД

**Мета роботи.** Розробка методології прискорених досліджень зносостійкості трибосполучень, які експлуатуються в умовах складного динамічного контактного навантаження та різних температур.

**Методи дослідження.** Розроблено методіку та установку для проведення прискорених досліджень матеріалів на зносостійкість з різними умовами навантаження (односпрямоване ковзання, удар з проковзуванням, удар з проковзуванням у двох взаємно перпендикулярних напрямках) близьких до експлуатаційних та температур, а також при роздільному впливі кожного з діючих на систему параметрів навантаження. Зміна величини навантаження та амплітуди переміщення зразків проводиться безпосередньо в ході випробувань за рахунок системи керування кроковими двигунами установки обчислювальною платформою Arduino Uno.

**Отримані результати.** Показано, що збільшення багатокomпонентності динамічного навантаження в контактній трибоспряженні призводить до збільшення інтенсивності зношування жароміцних сплавів. Зміна інтенсивності зношування, залежно від температури випробувань, має складний характер. Визначення закономірностей та розробка умов формування зносостійкого поверхневого шару деталей трибосполучень можливе на основі аналізу величини зносу та стану поверхні з урахуванням реального виду навантаження (односпрямоване ковзання, удар з проковзуванням, удар з проковзуванням у двох взаємно перпендикулярних напрямках).

**Наукова новизна.** Розглянуто фізичне моделювання процесу зношування бандажних полиць лопаток турбіни ГТД за складним термодинамічним навантаженням.

**Практична цінність.** Представлено установку та методологію проведення прискорених випробувань моделей фрикційних пар в умовах, наближених до реальних умов експлуатації трибосполучень з різними видами навантаження плоских деталей, що дозволяє дати технологічні рекомендації щодо підвищення зносостійкості газотурбінних двигунів. Проведення прискорених випробувань, що програмуються, дозволить вивчити стан трибосполучень у процесі циклу навантаження, наближеного до циклу роботи двигуна в льотному режимі.

**Ключові слова:** зношування, установка для випробування, бандажні полиці, лопатка, складне навантаження.

### Вступ

Розвиток газотурбінних двигунів (ГТД) як теплових машин йде шляхом підвищення таких параметрів термодинамічного циклу, як температура та тиск газу перед турбіною.

Основною перешкодою підвищення зазначених параметрів є недостатня міцність робочих лопаток турбін, зокрема і знос їх контактних поверхонь, за умов високотемпературних навантажень. Аналіз факторів, які забезпечують можливість підвищення температури

газу перед турбіною, вказує на пріоритет конструктивно-технологічних рішень перед матеріалознавчими. За останні 40 років покращення матеріалознавчих властивостей матеріалів лопаток турбін дозволило підняти температуру газового потоку перед турбіною на 60...100 градусів, а конструктивно-технологічні рішення на 300...350 градусів. Немає сумнівів у тому, що зазначена тенденція зберігатиметься найближчим часом [1].

При цьому виникає комбінований вплив високих температур, властивостей газового середовища та взаєм-

ного переміщення деталей з наявністю вібрацій, що діють у різних напрямках, у тому числі присутності ударного навантаження. Без урахування всього комплексу факторів навантаження відбувається спотворення результатів дослідження та створення картини процесу зношування, що мало відповідає реальній.

### Аналіз досліджень та публікацій

Встановлено [2, 3], що при роботі двигуна спостерігається істотне розсіювання по колу ротора умов навантаження будь-якої пари полиць по тиску в зоні контакту, амплітуді прослизання, частоті коливань. Тому в одному робочому колесі через неконтрольовані умови навантаження виникають зони підвищеного та зниженого зносу, причому розкид, за даними цієї роботи, може становити  $\pm 650\%$ . Розташування таких зон нині передбачити неможливо. Аналіз літературних джерел дозволив визначитися з приблизними межами параметрів для встановлення подальших випробувань на установці. Температури в області бандажних полиць лопаток:  $800 \dots 1050^\circ\text{C}$ , тиск в зоні контакту досягає  $60\text{ МПа}$  на злітно-посадкових режимах і не перевищує  $50\text{ МПа}$  при режимі роботи, що встановився.

Одним із найбільш трудомістких є визначення небезпечних резонансних частот. Лопатки коливаються з різними формами, з різною кількістю вузлових діаметрів у діапазоні від десятків Гц до десятків кГц (до  $40\text{ кГц}$ ). Найменша зміна геометрії конструкції, монтажного та робочого натягу, а також рівень зносу лопаток зсувають ці частоти. Найбільш логічним рішенням є вибір частот з амплітудно-частотної діаграми, одержаної для конкретної лопатки, конкретного двигуна, що досліджується. Прогнозований рівень амплітуд – до  $0,1\text{ мм}$ .

Випробування натурного вузла тертя не завжди можливі через тривалість випробувань та велику вартість проведення експерименту по повному циклу. Тому великого значення набувають методи прискорених випробувань пар тертя, при яких необхідний обсяг інформації про зносостійкість виходить у короткий термін [4]. Очевидно, найбільш прийнятним може виявитися метод випробувань, що базується на моделюванні натурних умов на динамічному стенді.

Відомо, що зношування жароміцних сплавів [5-7] може відбуватися за декількома різними механізмами. Різний характер зносу в залежності від температури має місце як для жароміцних сплавів на основі Ni та Co, так і для м'яких сталей на основі Fe. Зміна того чи іншого фактора навантаження та поява нового фактора призводить до зміни механізму зношування, його фізичної картини.

Окремими авторами [8, 9] проводилися дослідження при поєднанні деяких факторів навантаження. Автори цих досліджень приходять до висновків про неможливість охопити закономірності тертя в умовах складного навантаження в рамках єдиної теорії. Обґрунтовується провідна роль експерименту у подібних дослідженнях.

Додаткове навантаження одноразовим або періодичним ударним навантаженням може призвести до власних контактних коливань як у нормальному, так і в тангенціальному напрямках. Це, у свою чергу, може призвести до зниження сили тертя, яке і зазначалося в ряді робіт [9, 10]. При ударі може здійснюватися накладення факторів, що викликають деформування матеріалу, як у зоні контакту, так і в об'ємі. Співвідношення швидкостей удару, розмірів та матеріалів твердих тіл може бути таким, що за час контактування ударна хвиля багаторазово пройде всередині тіл. Амплітуда ударної хвилі може бути достатньою, щоб багаторазове переддеформування матеріалу в об'ємі призвело до підготовки процесу утворення тріщини та її поширення в контактній зоні.

### Мета роботи

Розробка методології прискорених досліджень зносостійкості трибосполучень, які експлуатуються в умовах складного динамічного контактного навантаження та різних температур.

### Матеріал і методика досліджень

Були розроблені методики та ряд установок для проведення прискорених досліджень матеріалів на зносостійкість з різними умовами навантаження (односпрямоване ковзання, удар з проковзуванням, удар з проковзуванням у двох взаємно перпендикулярних напрямках) [11-13]. Сутність методики досліджень полягає у визначенні закономірностей зношування трибологічних пар як в умовах близьких до експлуатаційних, так і при роздільному впливі кожного з параметрів навантаженості, що діють на систему, що дає можливість виявити внесок кожного з них у процесі пошкоджуваності. Зрештою, це дозволить запропонувати конструктивно-технологічні способи підвищення зносостійкості контактних поверхонь бандажованих лопаток.

Найбільш прийнятною для проведення модельних випробувань зносостійкості в умовах наближених до умов експлуатації більшості трибосполучень є установка, що представлена на рис. 1, так як дозволяє регулювати параметри навантаження за трьома напрямками.

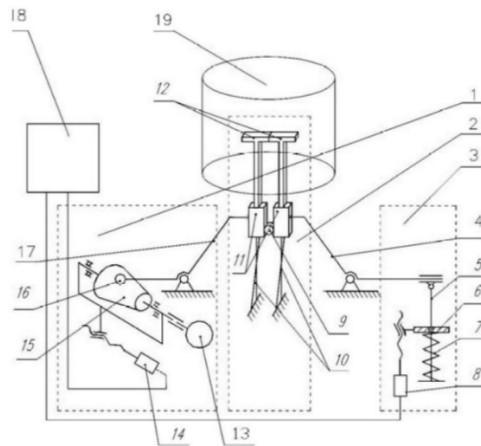


Рисунок 1. Схема установки для дослідження зношування

Окрім того, у разі потреби виділення процесів у «чистому вигляді», є можливість проводити випробування з різним навантаженням зразків з розривом та без розриву контакту, тобто. тільки з коливаннями та проковзуванням у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Установка містить: вузол завдання амплітуди коливань 1, вузол кріплення зразків 2, вузол завдання навантаження 3.

Вузол завдання навантаження 3 складається з важеля 4, шарнірно з'єднаного зі штоком 5, на якому розташовується пружина навантаження 7, з'єднана з кроковим двигуном 8 за допомогою упорної шайби 6 через передачу гвинт-гайка.

Вузол кріплення зразків містить 2 консольно закріплені пружинні пластинчасті тримачі 10. Вони мають закрутку і можуть містити змінний по висоті і ширині розмір поперечного перерізу. На тримачах розміщені розділені ролик 9 державки 11, у яких закріплені зразки 12.

Вузол завдання амплітуди поздовжніх коливань 1 складається з кінцевого кулачка 15, який муфтою з'єднаний з електродвигуном постійного струму 13. За допомогою передачі гвинт-гайка кроковий двигун 14, через ролик 16 з'єднаний з вузлом кріплення зразків 2.

Установка також забезпечена електронним блоком 18 і камерою 19 для завдання необхідних температур.

Зразки встановлюються в державки вузла кріплення зразків. Постійна відстань між ними в рухомому та нерухомому станах забезпечується роликом, який також виключає вплив прогину пружинних пластинчастих тримачів на повноту контакту робочих поверхонь зразків. Рух із необхідною амплітудою поздовжніх коливань забезпечується вузлом завдання амплітуди. Обертання кулачка, яке здійснюється електродвигуном, призводить до коливального руху з необхідною амплітудою через важіль-штовхач тримачів, державок і зразків. При цьому відбувається зіткнення та прослизання поверхонь зразків у поздовжньому напрямку.

Необхідний тиск у контакті забезпечується передачею навантаження зразкам через важіль від навантажувальної пружини та регулюється зміною ступеня стиснення останньої переміщенням упорної шайби вздовж штока (вузол завдання навантаження). Для зменшення зносу контакт кулачка 15 та коромислового важеля-штовхача здійснюється за допомогою ролика 16.

Зміна величини навантаження та амплітуди переміщення зразків безпосередньо в ході випробувань можлива зміною стиснення пружини та переміщення кулачка, за рахунок включення крокових електродвигунів відповідно до програми, що задається пристроєм ЧПК (електронний блок). Для проведення випробувань при відмінних від кімнатної температурах, зразки розташовуються в камері, в якій підтримується необхідна температура.

Наявність закрутки і різної жорсткості перерізів пружинного пластинчастого тримача призводить до виникнення коливань тримачів, а, отже, і прослизання полиць зразків у поперечному напрямку. В результаті

реалізується тривимірний навантажений стан поверхонь зразків: удар з подальшим прослизанням у двох взаємно перпендикулярних напрямках.

Зміна величини навантаження та амплітуди переміщення зразків можлива безпосередньо в ході випробувань, зміною стиснення пружини та переміщенням кулачка, за рахунок системи керування кроковими двигунами установки обчислювальною платформою Arduino Uno. Платформа побудована на основі мікропроцесора Atmega328. Програмування ведеться повністю через власну програмну оболонку (IDE), що у відкритому доступі на сайті Arduino. Мова програмування Arduino є стандартною C++ (використовується компілятор AVR-GCC) з деякими особливостями, що полегшують новачкам написання першої програми.

Розроблена принципова схема підключення (рис. 2) виконана з урахуванням можливостей керуючої платформи та вимог пристроїв, що підключаються. Реалізацію керування крокових двигунів виконано на драйверах A4988 (може бути замінений на DRV8825, DRV8834). Контролер A4988 дозволяє обмежувати струм, має захист від надто великого струму та перегріву, п'ять різних дозволів для мікрокроку (до 1/16 кроку).

Підключення двигуна, що задає частоту коливань зразків (рис. 1, поз. 13), виконано на базі потужного MOSFET-транзистора. Управління частотою двигуна реалізується через зміну мікропроцесором шпаруватості імпульсів, що відкривають MOSFET-транзистор IRL3705NS. Встановлений на валу двигуна цифровий датчик ходу A3144 реалізує систему зворотного зв'язку. Управління вузлом завдання температури передбачає встановлення двох клапанів на пальник. Перший (з метою безпеки) відкривається вручну, ступінь відкриття другого керується мікроконтролером за допомогою сервоприводу. Систему зворотного зв'язку здійснює термопара, підключена до мікроконтролера через підсилювач MAX31855.

Є блок вибору режимів випробування. Після вибору режиму здійснюється перехід до налаштування величин параметрів навантаження згідно з програмою випробування. Вмикаються до потрібного рівня крокові двигуни. Після налаштування рівнів параметрів, система надає оператору вибір: відредагувати їх, змінити сценарій випробування або запустити випробування.

Вибір матеріалів для досліджень обумовлений, перш за все, частотою застосування їх у трибосполученнях гарячої частини газотурбінних енергетичних установок і, зокрема, авіаційних двигунів. Як правило, для таких сполучень широко застосовуються жароміцні сплави на нікелевій основі, зміцнені дисперсною інтерметалідною фазою Ni<sub>3</sub> (Al, Ti) типу ХН77ТЮР (ЕІ437Б), а також зносостійкі композиційні евтектичні сплави на кобальтовій основі типу ХТН-61. Деталі, що виготовляються з жароміцних сплавів, працюють в найбільш складних умовах навантаження і тому схильні до інтенсивного зношування при динамічних контактних навантаженнях і підвищених температурах.

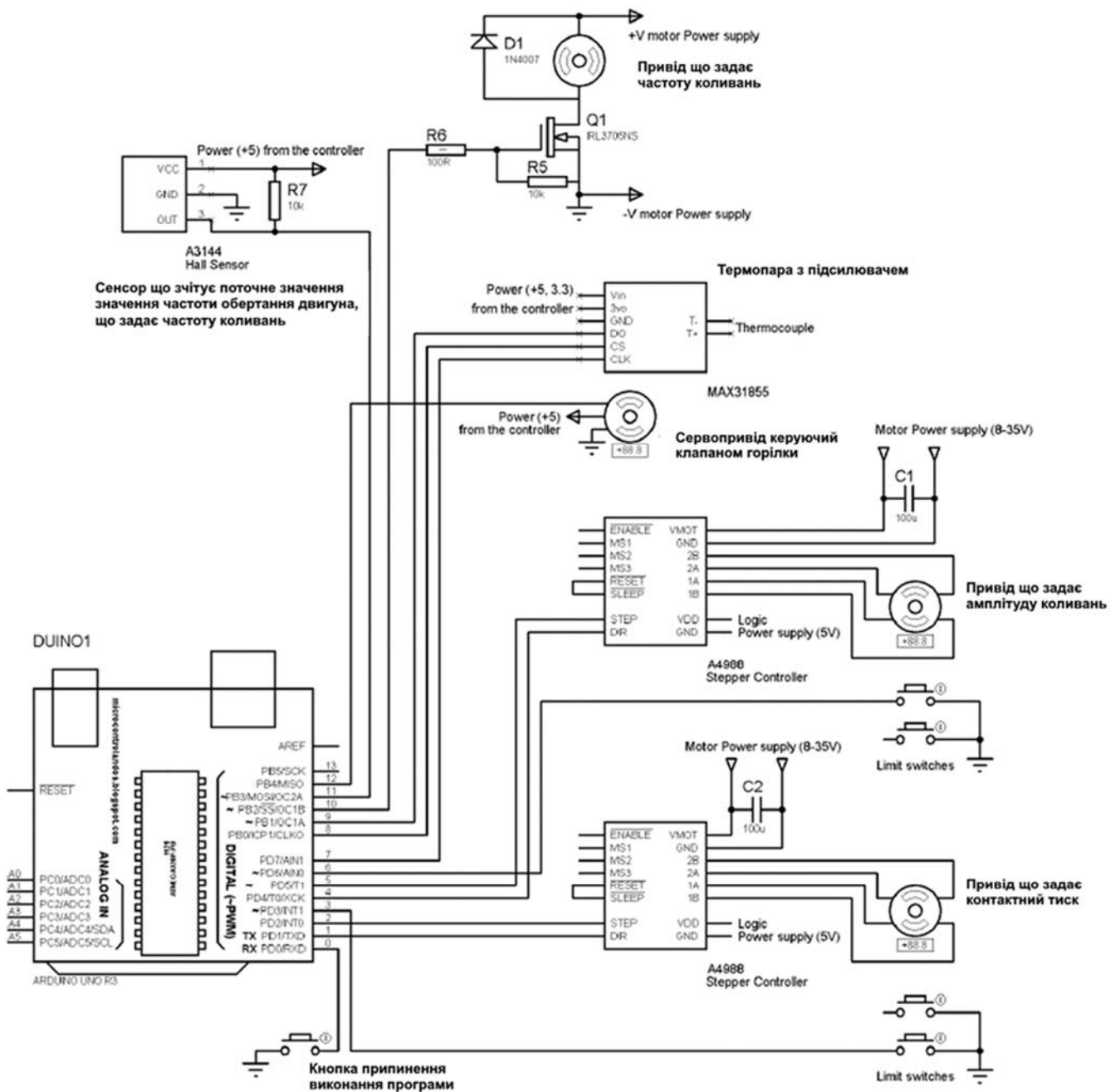


Рисунок 2. Схема підключення системи ЧПК

### Результати досліджень

Дослідження щодо визначення ступеня впливу умов динамічного навантаження на інтенсивність зношування досліджуваних сплавів були при однокомпонентному навантаженні (проковзуванні поздовжньому), двокомпонентному (удар з подальшим поздовжнім проковзуванням) і трикомпонентному (удар з проковзуванням у двох взаємно перпендикулярних напрямках). Випробування, проведені в умовах двокомпонентного та трикомпонентного навантаження, від-

бувалися з розривом контакту, а, отже, контактна взаємодія зразків мала ударний характер. У разі змінного нормального навантаження розрив контакту веде до зміни його значення від нуля за відсутності контактування до дуже великих значень на момент зіткнення.

Умови проведення випробувань: амплітуда поперечних ковзань 0,05 мм; амплітуда поздовжніх ковзань 0,1 мм; частота поперечних ковзань 30 Гц; частота поздовжніх ковзань 66 Гц; нормальне навантаження 20 Н, час випробувань за кімнатної температури до 4 годин. Результати випробувань представлені рис. 3.

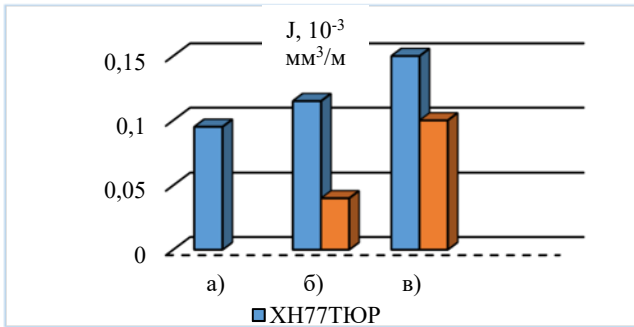


Рисунок 3. Діаграма зміни інтенсивності зношування жароміцних сплавів при:

а – однокомпонентному, б – двокомпонентному, в – трикомпонентному навантаженні

### Обговорення

Як випливає з отриманих результатів, збільшення багатоконтактності динамічного навантаження в контактній трибоспиральній призводить до збільшення інтенсивності зношування металів, що визначається відношенням обсягу зношеного металу до шляху тертя. Додавання ударного навантаження (двокомпонентне навантаження) в умовах тертя ковзання, що розглядаються, супроводжується підвищенням інтенсивності зношування зразків зі сплаву XH77TiO9 – в 1,2 рази. Додавання до двокомпонентного навантаження додаткового проковзування в напрямку перпендикулярному до початкового проковзування (трикомпонентне навантаження), супроводжується ще більшим збільшенням інтенсивності зношування – для сплаву XH77TiO9 в 1,4 рази, для сплаву ХТН-61 в 2,5.

Враховуючи отримані перспективні показники зносостійкості сплаву ХТН-61, при складному навантаженні доцільно виявлення особливостей його зносу в умовах високих температур. Цей сплав має заевтектичну структуру з первинними зернами карбіду (Ti, Nb)C та евтектикою Co+(Ti, Nb)C, характеризується двофазністю, одна фаза матрична, друга – карбідна. Висока зносостійкість цього сплаву досягається рівномірним розподілом високоміцної матричної фази твердого розчину на основі кобальту, що дозволяє, зокрема, ефективно використовувати його для напайок на бандажні полиці лопаток ГТД. Складний хімічний склад сплаву ХТН-61 передбачає всебічне вивчення його зносостійкості за умов найбільш наближених до експлуатаційних.

Контактна взаємодія двох плоских зразків моделювалася в режимі зіткнення з подальшим проковзуванням при температурах 20, 500, 900 і 1000 °С в повітряному середовищі. Нормальне питоме ударне навантаження становило від 0 до 0,6 Н/мм<sup>2</sup>, взаємне переміщення зразків відбувалося з амплітудою 0,17 мм та частотою 66 Гц, час випробувань – 2 години. Графіки інтенсивності зношування залежно від температури випробувань наведено рис. 4.

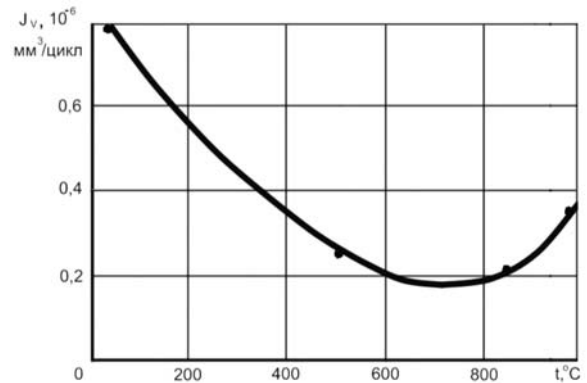


Рисунок 4. Залежність зміни інтенсивності зношування сплаву ХТН-61 від температури випробувань

Зниження зносу при температурах до 600...700 °С пояснюється утворенням міцно зчепленої з металом оксидної плівки, що діє на кшталт твердого мастила [14]. Відбувається тертя оксиду по оксиду і підвищення температури, що сприяє швидшому утворенню оксидної плівки. Подальше підвищення температури супроводжується збільшенням інтенсивності зношування внаслідок втрати несучої здатності поверхневого шару.

Отриманий характер залежностей, може свідчити про зміну механізму деформації в поверхневих шарах матеріалів, що контактуються. При підвищених температурах (понад 0,4...0,5 T<sub>пл</sub>) пластичність дисперсійно-зміцнених нікелевих сплавів швидко зменшується, що у свою чергу пов'язано з переходом характеру руйнування від транскристалітного до інтеркристалітного внаслідок збільшення ступеня зернограничного проковзування [15, 16]. Додаток динамічного навантаження під час контактної взаємодії посилює цей процес.

### Висновки

Складна взаємодія деталей трибосполучень у контактній зоні повинна враховуватися при побудові моделей контактування та прогнозуванні поверхневої міцності матеріалів при динамічних навантаженнях і, відповідно, умови проведення випробувань повинні бути якомога ближче наближені до реальних умов експлуатації. Визначення закономірностей та розробка умов формування зносостійкого поверхневого шару деталей трибосполучень можливе на основі аналізу величини зносу та стану поверхні з урахуванням реального виду навантаження (односпрямоване ковзання, удар з проковзуванням, удар з проковзуванням у двох взаємно перпендикулярних напрямках). Це дасть можливість розглянути фізичні основи пластично-деструкційних явищ у зоні контакту трибосполучень з урахуванням дії продуктів зношування поверхні та розробити рекомендації щодо забезпечення зносостійкого поверхневого шару контактуючих деталей.

Крім того, проведення прискорених випробувань, що програмується, дозволить вивчити стан зразків у процесі циклу навантаження, наближеного до циклу

роботи двигуна в льотному режимі. Фізичне моделювання процесу та аналіз результатів експериментів дозволить дати технологічні рекомендації щодо рівномірного розподілу зносу бандажних полиць робочих лопаток як найбільш відповідальних деталей ротора турбіни, що згодом стане підставою більш точного прогнозування роботи лопаток у реальних умовах.

#### Список літератури

1. Меркулов В. М. О выборе способа бандажирования рабочих лопаток турбин ГТД / В. М. Меркулов, Ф. Д. Ильющенко // Вестник двигателестроения. – 2005. – № 2. – С. 114–117.
2. Муравченко Ф. М. Актуальные проблемы динамики, прочности и надежности авиадвигателей / Ф. М. Муравченко // Проблемы прочности. – 2008. – № 5. – С. 7–14.
3. Колебания бандажированного рабочего колеса ГТД / Ю. С. Воробьев, К. Ю. Дьяконенко, В. Н. Романенко и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 9. – С. 87–90.
4. Tsyganov V. V. The methodological principles of the engineering of tribocoupling details surface under multicomponent loading / V. V. Tsyganov, L. Y. Ivschenko // Materials Science and Technology. – 2018. – MS and T 2018. – P. 578–584.
5. Wang Dao-Juan. Effect of microstructure and properties on the high temperature wear characteristics of 3Cr2W8V (H21) steel / Dao-Juan Wang, De-Lin Sku, Xin-Cheng Gua. – Wear. – 1987. – P. 101–117.
6. Yurov V. M. The impact of the environment on the contact potential difference of metal machine parts / Yurov V. M., Oleshko V. S. // Eurasian Physical Technical Journal. – 2019. – Vol. 16. – No1 (31). – P. 99–108.
7. Iwabuchi A. Fretting wear of Inconel 625 at high temperature and high L vacuum / A. Iwabuchi // Wear. – 1985. – № 1–3. – P. 163–175.

8. Рыжов Э. В. Контактное взаимодействие твердых тел при статических и динамических нагрузках / Э. В. Рыжов. – М. : Машиностроение, 1988. – 250 с.

9. Eremin E. N. Wear resistance and tribological properties of high entropy coatings CrNiTiZrCu / Eremin E. N., Yurov V. M., Guchenko S. A. // Eurasian Physical Technical Journal. – 2020. – No 1. – P. 13–18.

10. Development of a device for determining work electron output / Makeeva O. V., Oleshko V. S., Fedorov A. V., Yurov V. M. // Eurasian Physical Technical Journal. 2020. – No 1. – P. 127–131.

11. Tsyganov V. V., Sheyko S. Features of engineering the wear-resistant surface of parts with the multicomponent dynamic load / Tsyganov V. V., Sheyko S. // Wear. – 2022. – P. 494–495, 204255.

12. Tsyganov V. V. Increasing Wear Resistance of Steel by Optimizing Structural State of Surface Layer / V. V. Tsyganov, R. E. Mokhnach, S. P. Sheiko // Steel in Translation. – 2021. – Vol. 51. – No 2. – P.144–147.

13. Ivschenko L. Y., Tsyganov V. V., Adjerid S., Influence des conditions de chargement dynamique sur la resistance a l'usure des tribocontacts, Journal Matériaux & Techniques. 4 (2013) 403.1–403.7.

14. Wang Dao-Juan. Effect of microstructure and properties on the high temperature wear characteristics of 3Cr2W8V (H21) steel / Dao-Juan Wang, De-Lin Sku, Xin-Cheng Gua // Wear. – 1987. – P. 101–117.

15. Application of the protective coating for blade's thermal protection / Frackowiak A., Olejnik A., Wróblewska A., Ciałkowski M. // Energies. – 2021. – 14(1): 50.

16. Creation of wearproof eutectic composition materials for the details of the high temperature dynamic systems / Tsyganov V., Ivschenko L., Byalik H. et al. // MS and T 2019. Materials Science and Technology 2019. – 2019. – P. 450–456.

Одержано 15.01.2024

## PHYSICAL MODELING OF WEARING PROCESSES OF THE AIRFOIL SHROUD PLATFORMS OF GAS TURBINE ENGINE

- Komochkin M. Leading design engineer of Pulsar Expo Ukraine LLC, Kyiv, Ukraine, *e-mail*: 011079n@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1838-5442
- Tsyganov V. Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Professor of the Department of Machine-tool Sand Instrument, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: tsyganov705@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5682-7005
- Sakhniuk N. Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of Aircraft Engine Technology, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: nat76sah@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2664-2602
- Lazarieva O. Senior Teacher of the Department of Aircraft Engine Technology, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: lazarevaolha@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3417-6309
- Kryvykh Y. Senior Teacher of the Department of Aircraft Engine Technology, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: juliya.krivikh@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3183-8776

**Purpose.** Development of a methodology for accelerated studies on the wear resistance of tribo-combinations operating under complex dynamic contact loading conditions and varying temperatures.

**Research methods.** A methodology and setup have been devised for conducting accelerated studies on the wear resistance of materials under various loading conditions (unidirectional sliding, impact with sliding, impact with sliding in two mutually perpendicular directions) similar to operational conditions and temperatures. Additionally, the separate influence of each parameter affecting the system load is considered. The variation in load magnitude and displacement amplitudes of specimens is carried out directly during the tests using a control system with stepper motors controlled by the Arduino Uno computing platform.

**Results.** It is demonstrated that the increase in the multicomponent nature of dynamic loading in tribo-coupling contact leads to an escalation in the intensity of wear of heat-resistant alloys. The variation in wear intensity, depending on the test temperature, exhibits a complex nature. Determining the regularities and developing the conditions for the formation of a wear-resistant surface layer of parts of tribo-combinations is possible based on the analysis of the amount of wear and the condition of the surface, taking into account the real type of load (unidirectional sliding, impact with sliding, impact with sliding in two mutually perpendicular directions).

**Scientific novelty.** The physical modeling of the process of wear of the bandage shelves of the blades of the gas turbine under a complex thermodynamic load is considered.

**Practical value.** The setup and methodology for conducting accelerated tests of friction pair models under conditions approximating real tribo-combinations operating conditions with various types of loading on flat details are presented. This allows providing technological recommendations for enhancing the wear resistance of gas turbine engines. Conducting accelerated programmable tests will allow to study the condition of the tri-junctions during a load cycle close to the engine duty cycle in flight mode.

**Key words:** wear, testing setup, bandage shelves, blade, complex loading.

## References

1. Merkulov V. M., Ilyushchenko F. D. (2005). O vybore sposoba bandazhivaniya rabochih lopatok turbin GTD [On the choice of a method for banding the working blades of gas turbine engines]. *Aeroenginebuilding*, 2, 114–117.
2. Muravchenko F. M. (2008). Aktualnye problemy dinamiki, prochnosti i nadezhnosti aviadvigatelej [Current problems of dynamics, strength and reliability of aircraft engines]. *Problems of strength*, 5, 7–14.
3. Vorobiev Yu. S., Dyakonenko K. Yu., Romanenko V. N., Kulishov S. B., Skritsky A. N. (2006). Kolebaniya bandazhyrovannogo rabocheho kola HTD [Vibrations of a banded impeller of a gas turbine engine]. *Aerospace engineering and technology*, 9, 87–90.
4. Tsyganov V. V., Ivschenko L. Y. (2018). The methodological principles of the engineering of tribocoupling details surface under multicomponent loading. *Materials Science and Technology 2018, MS and T 2018*, 578–584.
5. Dao-Juan Wang, De-Lin Sku, Xin-Cheng Gua. (1987). Effect of microstructure and properties on the high temperature wear characteristics of 3Cr2W8V (H21) steel. *Wear*, 101–117.
6. Yurov V. M., Oleshko V. S. (2019). The impact of the environment on the contact potential difference of metal machine parts. *Eurasian Physical Technical Journal*, 16,1 (31), 99–108.
7. Iwabuchi A. (1985). Fretting wear of Inconel 625 at high temperature and high L vacuum. *Wear*, 1–3, 163–175.
8. Ryzhov E. V. (1988). Contacting solid bodies under static and dynamic loads. Moscow : Mechanical engineering, 250.
9. Eremin E. N., Yurov V. M., Guchenko S. A. (2020). Wear resistance and tribological properties of high entropy coatings CrNiTiZrCu. *Eurasian Physical Technical Journal*, 1, 13–18.
10. Makeeva O. V., Oleshko V. S., Fedorov A. V., Yurov V. M. (2020). Development of a device for determining work electron output. *Eurasian Physical Technical Journal*, 1, 127–131.
11. Tsyganov V. V., Sheyko S. (2022). Features of engineering the wear-resistant surface of parts with the multicomponent dynamic load. *Wear*, 494–495, 204255.
12. Tsyganov V. V., Mokhnach R. E., Sheiko S. P. (2021). Increasing Wear Resistance of Steel by Optimizing Structural State of Surface Layer. *Steel in Translation*, 51, 2, 144–147.
13. Ivschenko L. Y., Tsyganov V. V., Adjerid S. (2013). Influence des conditions de chargement dynamique sur la resistance a l'usure des tribocontacts. *Journal Matériaux & Techniques*, 4, 403.1–403.7.
14. Dao-Juan Wang, De-Lin Sku, Xin-Cheng Gua. Effect of microstructure and properties on the high temperature wear characteristics of 3Cr2W8V (H21) steel. *Wear*, 1987, 101–117.
15. Frackowiak A., Olejnik A., Wróblewska A., Ciałkowski M. (2021). Application of the protective coating for blade's thermal protection. *Energies*, 2021, 14(1): 50.
16. Tsyganov V., Ivschenko L., Byalik H., Mokhnach R., Sakhniuk N. (2019). Creation of wearproof eutecticum composition materials for the details of the high temperature dynamic systems, MS and T 2019. *Materials Science and Technology 2019*, 450–456.

Одержано 18.01.2024