



Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Запорізька політехніка» (Україна)
ДП «ІВЧЕНКО-ПРОГРЕС» (Україна)
АТ «МОТОР СІЧ» (Україна)
Грузинський технічний університет (Грузія)
Університет науки і технологій AGH Станіслава Сташича (Польща)



ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ

Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів,
аспірантів і молодих учених з міжнародною участю

«Молодь в авіації: нові рішення та перспективні технології»

Присвячується

*125-річчю Національного університету
«Запорізька політехніка»*

95-річчю Машинобудівного факультету

20-річчю кафедри «Технології авіаційних двигунів»

80-річчю ДП «ІВЧЕНКО-ПРОГРЕС»

21–22 листопада 2024 р.

Електронне видання на CD-ROM

м. Запоріжжя, 2024

УДК 629.735
Т-299

Рекомендовано до видання Вченою радою
Національного університету «Запорізька політехніка»
(Протокол № 6 від 28 січня 2025 р.)

Редакційна колегія:

Павленко Д. В., д-р техн. наук, професор (відпов. ред.)
Качан О. Я., д-р техн. наук, професор
Балушок К. Б., канд. техн. наук, доцент
Кондратюк Е. В., канд. техн. наук, доцент
Сахнюк Н. В., канд. техн. наук, доцент
Лазарева О. О., ст. викладач каф. ТАД
Савчук Н. О., нач. редакційно-видавничого відділу
Гембель В. Й., зав. навч. лабораторією

Т-299 Тези доповідей Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих учених з міжнародною участю «Молодь в авіації: нові рішення та перспективні технології», Запоріжжя, 21–22 листопада 2024 р. [Електронний ресурс] / Редкол. : Д. В. Павленко (відпов. ред.) Електрон. дані. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2024. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см. – Назва з тит. екрана. – 156 с.

ISBN 978-617-529-484-0

До збірки включено тези доповідей, заслуханих на Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів, аспірантів і молодих учених з міжнародною участю. Збірка відображає широкий спектр тематики наукових досліджень, нових рішень та перспективних технологій в авіації. Збірка розрахована на широкий загал дослідників та науковців.

УДК 629.735
Т-299

ISBN 978-617-529-484-0 © НУ «Запорізька політехніка», 2024

ЗМІСТ

Пленарне засідання

Luka Guraspashvili, Ramin Zukakishvili

ADVANCED COMPUTATIONAL MATHEMATICS AND CFD
SIMULATIONS FOR THE ANALYSIS OF FLIGHT MECHANICS IN
AIRCRAFT ENGINEERING 10

Шаповал А.С., Павленко Д.В.

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ
ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ЗА ДОПОМОГОЮ
ОПТИМІЗАЦІЙНИХ ПРОГРАМНИХ КОМПЛЕКСІВ..... 12

Mykhaylo Kybalnyy, Oleksii Prytula, Valentyn Pelykh

DETERMINING THE OPTIMAL LOCATION OF A STATIC PORT
USING CFD METHODS..... 15

Білінонок Д.І., Шило В.Г., Педаш О.О.

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТАЛУРГІЇ ГРАНУЛ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ
ДИСКІВ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ 17

Oleksii Prytula, Mykhaylo Kybalnyy

DETERMINATION OF NATURAL FREQUENCIES OF
HELICOPTER ROTOR BLADES..... 19

Двірник Я.В., Єсауленко С.В.

МЕХАНІЗМИ ВИНИКНЕННЯ ТА РОЗВИТКУ ВТОМНИХ
ПОШКОДЖЕНЬ НА ХВОСТОВИКАХ РОБОЧИХ ЛОПАТОК
КОМПРЕСОРА ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА З ТИТАНОВИХ
СПЛАВІВ 21

Конструкція і міцність

Valentyn Pelykh, Mykhaylo Kybalnyy

DETERMINATION OF THE OPTIMAL VALUE OF TIGHTENING
FORCE FOR BUSHINGS OF A BLADE ROOT CUFF
ATTACHMENT OF A TRANSPORT HELICOPTER 24

Собченко С.В., Уланов С.О.

АНАЛІЗ ВИНИКАЮЧИХ НЕВІДПОВІДНОСТЕЙ НА СТАТОРІ
КОМПРЕСОРІВ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ В ПРОЦЕСІ
ЕКСПЛУАТАЦІЇ 26

Голтвяниця В.С., Домніч І.С., Задніпровський Ю.О.

ВАКУУМНО-ДУГОВІ (Ti-Cr)N ПОКРИТТЯ ДЛЯ ЗАХИСТУ
ПОВЕРХНІ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ЛІТАЛЬНИХ
АППАРАТІВ..... 28

Ратинський А.В., Деркач О.Л. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОТОВЩЕННЯ ОБОДА НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ДИСКА КОМПРЕСОРА АВІАЦІЙНОГО ГТД.....	30
Тумарченко Л.О. АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ У ВИРОБНИЦТВІ ТА ВІЙСЬКОВОМУ СЕКТОРІ	32
Горідько О.В., Михайленко Т.П., Петухов І.І. ОСОБЛИВОСТІ ОХОЛОДЖЕННЯ ОЛИВИ В АВІАЦІЙНОМУ ДВИГУНІ З УРАХУВАННЯМ ДВОФАЗНОГО СЕРЕДОВИЩА	33
Сбродов Є.В., Юзефович Р.М. ВІБРОДІАГНОСТИКА АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ МЕТОДОМ ПЕРІОДИЧНО НЕСТАЦІОНАРНИХ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ.....	35
Котов О.Б., Лівертовський М.І. АСПЕКТИ ПРОЕКТУВАННЯ СИЛОВИХ УСТАНОВОК БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ	37
Шакало Р.Ю., Ларін О.О., Савченко К.В. РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОЧАТКОВОГО ПАРАМЕТРУ СПРЯЖЕННЯ БАНДАЖНИХ ПОЛИЦЬ ПОПАРНО БАНДАЖОВАНИХ ЛОПАТОК НА СТАТИЧНІ НАПРУЖЕННЯ У ПЕРІ ЛОПАТКИ.....	39
Грачов Д.О., Лисяков С.І. ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ ВИРОБНИЧИХ ДЕФЕКТІВ НА ВТОМНУ МІЦНІСТЬ ОСНОВНИХ СИЛОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЛОПАТИ НЕСУЧОГО ГВИНТА ДЛЯ ВЕРТОЛЬОТІВ ТИПУ МИ-8.....	41
Войтенко І.В., Торба Ю.І. ВИМОГИ ДО СИСТЕМИ ВІБРОДІАГНОСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ НЕСТІЙКИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГТД.....	43
Красников О.О., Кухтін Ю.П. ЗНИЖЕННЯ ВІБРОНАПРУЖЕНОСТІ ЛОПАТОК ОСЬОВОГО КОМПРЕСОРА ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА.....	45
Пальчиковський В.О., Морозов А.В., Торба Ю.І. МЕТОДИ ДІАГНОСТУВАННЯ ПОШКОДЖЕНЬ КОМПОЗИТНОЇ ЛОПАТИ ПОВІТРЯНОГО ГВИНТА ПРИ ВТОМНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ	47
Пальчиковський В.О., Морозов А.В., Торба Ю.І. РЕЗОНАНСНИЙ МЕТОД ВТОМНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВИРОБІВ З КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ	49
Гвоздик Р.П., Бабенко О.М. ЕЛЕКТРОПНЕВМАТИЧНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ КЛАПАНАМИ ПЕРЕПУСКУ ПОВІТРЯ.....	51

Котов О.Б., Семенов Є.В. КЛЮЧОВІ АСПЕКТИ МЕТОДИКИ СТВОРЕННЯ СУЧАСНИХ БЕЗПІЛОТНИХ АВІАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ ЛІТАКОВОГО ТИПУ ПЕРШОГО КЛАСУ	53
Колісник О.В. ОЦІНКА МІЦНІСНОЇ НАДІЙНОСТІ ОСНОВНИХ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСМІСІЇ ВЕРТОЛЬОТА ТИПУ МІ-8 ПРИ РОБОТІ З ФОРСОВАНИМИ ДВИГУНАМИ	55
Пухловський С.В., Качан О.Я. ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ МУЛЬТИЦИКЛОННОГО ПИЛОЗАХИСНОГО ПРИСТРОЮ	57
Красуляк І.М., Стрілецький Ю. Й. ОПОСЕРЕДКОВАНИЙ КОНТРОЛЬ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЧЕРЕЗ АНАЛІЗ ТЕМПЕРАТУРНИХ ГРАДІЄНТІВ.....	59

Технологія виробництва і ремонту

Філіпковський С.В., Джуринський О.М. АДДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ У СУЧАСНОМУ АВІАБУДУВАННІ	61
Уланов С.О., Качан О.Я. ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ НА НЕСУЧУ ЗДАТНІСТЬ ТОНКОСТІННИХ ВАЛІВ ГТД	63
Левченко А.В., Тришин П.Р., Козлова О.Б. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ СИЛ ПРИ РЕГЕНЕРАТИВНІЙ ВІБРАЦІЇ	65
Яковлев О.В., Бабенко О.М. МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ПІДВИЩЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ КОМПОЗИТНИХ КАБІН ПОВІТРЯНИХ СУДЕН	67
Куц Д.О., Басов Ю.Ф. ПІДВИЩЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ВИТРАТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАВИХРЮВАЧА КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....	69
Чагаров М.М. МЕХАНІЧНО-ЗАМКНУТИЙ СТЕНД ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ РЕДУКТОРІВ.....	71
Гембель І.Ю., Чумак І.М., Тришин П.Р., Козлова О.Б. ФІЗИЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ВИНИКНЕННЯ ВІБРАЦІЇ ПРИ ТОКАРНІЙ ОБРОБЦІ	73

Півень І.П.

ВСТАНОВЛЕННЯ Й ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСІВ ВАЛЬНИЦЯМ НА ПІДСТАВІ ЇХ РЕСУРСНИХ ВИПРОБУВАНЬ НА ВАЛЬНИЧНОМУ СТЕНДІ	75
---	----

Татаринов О.П.

ОСВОЄННЯ ВИРОБНИЦТВА ЗМІННИХ НЕПЕРЕТОЧУВАНИХ ПЛАСТИН (ЗНП) ДЛЯ ЧОРНОВОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ АВІАДВИГУНІ	77
---	----

Зеленський О.В., Куліш Є.Д.

ЗАСТОСУВАННЯ АЕРОДИНАМОМЕТРІВ ПРИ ВИПРОБУВАННІ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ	79
---	----

**Сахно С.С., Григоренко М.С., Панченко П.Ю., Тігаренко І.О.,
Білаш Д.І.**

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЩІЛЬНОСТІ ПОКРИТТЯ НА РОБОЧІЙ ПОВЕРХНІ КРИШКИ ВІСК ДЛЯ ВІЛЬНОГО ПРОХОДЖЕННЯ НАДЗВУКОВОГО ГАЗОВОГО ПОТОКУ	81
---	----

Дядя С.І., Карамушка Д.Р.

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОСТІ РІЗАННЯ ПРИ КІНЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ	83
---	----

Криворученко В.Л., Гончар Н.В.

СУЧАСНІ ТА ПЕРСПЕКТИВНІ МЕТОДИ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНОГО ДВИГУНА	84
--	----

Веркалець А.А., Іванів І.В., Онисько О.Р., Барц Крістіан
ПРОБЛЕМИ ТОЧНОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ТРАПЕЦІСВИДНОГО
ПРОФІЛЮ ХОДОВИХ ГВИНТІВ 86 |

Дядя С. І., Яхно Д.А.

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМАТИКИ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ З КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ	88
--	----

Котов М.М., Сахно С.С., Снесарь С.Б.

ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ФАКТОРІВ НАДІЙНОЇ РОБОТИ ДЕТАЛЕЙ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ПЛАЗМОВИХ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У СКЛАДІ АВІАЦІЙНОГО ДВИГУНА	90
--	----

Федосєєва В.О., Матюхін А.Ю.

ВДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ, ЩО ВИКОРИСТОВУЄТЬСЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРА ГТД	92
---	----

Безлюдний О.В., Бабенко О.М.

ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗКОНТАКТНОЇ ІМПУЛЬСНО- МАГНІТНОЇ ОЧИСТКИ НЕРОЗБІРНИХ ВАЛЬНИЦЬ	94
--	----

Подобний О.В., Мордюк Б.М., Павленко Д.В., Торба Ю.І. ВПЛИВ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОГО РІЗАННЯ ТА УЛЬТРАЗВУКОВОГО МОДИФІКУВАННЯ НА ЯКІСТЬ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ	96
Павленко Д.В., Торба Ю.І., Федоров І.О. ЯКІСТЬ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРУ ВИГОТОВЛЕНИХ З ПОРОШКІВ ТИТАНУ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ ІНТЕНСИВНОГО УЩІЛЬНЕННЯ	98
Комісаров О.О., Дядя С.І. ВИКОРИСТАННЯ НОВІТНІХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА У АВІАЦІЙНІЙ ГАЛУЗІ	100
Товстюченко В.В., Матюхін А.Ю. ВДОСКОНАЛЕННЯ РЕМОНТУ ГОЛОВНОГО ВЕРТОЛІТНОГО РЕДУКТОРАВР-8А.....	101
Шовкопляс М.В., Роп'як Л.Я. ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ХРОМОВИХ ПОКРИТТІВ.....	103
Гребенніков М.О., Гончар Н.В. ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ СУХОГО ЕЛЕКТРОПОЛІРУВАННЯ ПІД ЧАС ВИГОТОВЛЕННЯ РОТОРНИХ ЛОПАТОК	106
Гайдзік Божена, Роп'як Л.Я., Винар Т.В. ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В НАВОДНЮЮЧИХ СЕРЕДОВИЩАХ.....	108
Прунько І.Б., Курилів Ю.О. ВИПРОБУВАННЯ СТАЛЬНИХ ЗРАЗКІВ НА ЗНОС ПРИ ЇХ ВЗАЄМОДІЇ З АБРАЗИВНИМИ ЗЕРНАМИ, ПРУЖНОЗАКРІПЛЕНИМИ В ЕЛАСТИЧНОМУ КОНТРТІЛІ.....	111
Присяжнюк П.М., Махнік Ришард, Бембенек Міхал, Тирлич М.В. ШЛЯХИ УДОСКОНАЛЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ ЗА УМОВ УДАРНО-АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ	113
Manzhos V.G., Ivashishin O.M., Savakin D.G., Torba Uy.I. INCONEL 718 ALLOY PRODUCTS MANUFACTURED USING METAL INJECTION MOLDING APPROACH.....	115
Обдул В.Д., Широкобокова Н.В., Фокін С.М. ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ВІДПОВІДАЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ ВЕРТОЛІТНИХ РЕДУКТОРІВ З КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	117

Матеріали авіаційного виробництва

Джуган О.А., Кирилах С.В. МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ НЕСФЕРИЧНИХ ТИТАНОВИХ ПОРОШКІВ ДЛЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ	119
Галєнкова О.Б., Куц Д.О., Урекін Д.В. ПІДВИЩЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ СПЛАВУ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІДУ ТИТАНУ ШЛЯХОМ МОДИФІКУВАННЯ	121
Тесля С.Ю., Наконечний С.О., Троснікова І.Ю., Юркова О.І., Лобода П.І. СИНТЕЗ ВИСОКОЕНТРОПІЙНОГО $AlTiFeNiNb$ СПЛАВУ ТА ЙОГО ТЕРМОСТАБІЛЬНІСТЬ	123
Наконечний С.О., Юркова О.І., Лобода П.І. ВИСОКОЕНТРОПІЙНИЙ $AlCrNiTiV$ СПЛАВ, САМОАРМОВАНІЙ ЧАСТИНКАМИ ДИБОРИДУ ТИТАНУ	125
Швед М.М., Подгурська В.Я., Клименко І.О., Купрін О.С., Голтвяниця В.С. РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ TiN І CRN ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ	127
Кирилах С.В., Коваленко М.В., Мітяєв О.А., Повзло В.М. ЗАСТОСУВАННЯ АЛЮМО-СВИНЦЕВИХ ($Al-Pb$) КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ	129
Лофердюк В.І., Мітяєва З.А., Мітяєв О.А., Повзло В.М. НАНОМОДИФІКУВАННЯ ПОРШНЕВОГО СИЛУМІНУ $AK12M2MGH$	131
Лазарєв І.О., Присяжнюк П.М., Роп'як Л.Я. ЛЕГУВАННЯ ЖАРОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ ОКСИДУ АЛЮМІНІЮ	133
Алексєєнко М.І., Акімов І.В. ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГРАФІТИЗОВАНИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ГАЛЬМІВНИХ СИСТЕМ	135
Сохрякова І.М., Безсонов П.Г., Мітяєв О.А., Повзло В.М. ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ НАНОМОДИФІКАТОРА АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ	137
Романів М.М., Роп'як Л.Я. ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ПОКРИТТІВ НА АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВАХ ПЛАЗМОВИМ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИМ ОКСИДУВАННЯМ	139

Підтримка та організація виробництва

Дерев'ягін М.В., Прушківський В.Г. РОЗВИТОК АВІАБУДІВНОЇ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ ТА АКТИВНОГО ВПРОВАДЖЕННЯ ІНДУСТРІЇ 4.0	142
Лазарєва О.О., Гембель І.Ю., Сахнюк Н.В., Гембель В.Й. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА ОСВІТНІЙ ПРОЦЕС СТУДЕНТІВ ТЕХНІЧНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ У ЗАКЛАДАХ ВИЩОЇ ОСВІТИ ТА ЇХ РОЛЬ У ПОКРАЩЕННІ ЯКОСТІ НАВЧАННЯ	144
Букатка Ю.С., Копей В.Б. ДОСВІД ВИКОРИСТАННЯ RUTRON ТА ЇЇ ПАКЕТІВ ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПІДТРИМКИ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ВИРОБУ	146
Лазарєв І.О., Лазарєва О.О., Сахнюк Н.В., Пашечко М.І. ОГЛЯД АКТУАЛЬНИХ ПРОБЛЕМ РОЗВИТКУ ПАСАЖИРСЬКИХ АВІАПЕРЕВЕЗЕНЬ В УКРАЇНІ ПІД ЧАС ВОЄННОГО СТАНУ	148
Хвостак В.В., Стадник С.О. МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МОЗАІЧНИХ МЕТАЛЕВИХ БРОНЕЕЛЕМЕНТІВ У КОНСТРУКЦІЇ БРОНЕЖИЛЕТІВ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ПРОТИКУЛЬОВОГО ЗАХИСТУ	150
Вуйцица-Мигасюк Д., Готра О., Роп'як Л.Я., Гоголюк Л.В. МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ БУРИЛЬНИХ ТРУБ ІЗ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ	153

UDC 004.9:532.5:531:629.7

Luka Guraspashvili

Bachelor's Student, Aeronautical Engineering, Georgian Technical
University, Tbilisi Georgia

Lead Supervisor: Dr. Ramin Zukakishvili

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Aeronautical
Engineering Program, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia

ADVANCED COMPUTATIONAL MATHEMATICS AND CFD SIMULATIONS FOR THE ANALYSIS OF FLIGHT MECHANICS IN AIRCRAFT ENGINEERING

Introduction

In the field of aircraft engineering, understating the behavior of flight mechanics and control is crucial for designing optimal aircraft for performance and ensuring stability during flight. Flight analysis is often conducted with physical prototypes and wind tunnel tests which are quite unconventional and expensive to conduct. However, advancements in computational methods, programming languages and CFD (Computational Fluid Dynamics) have significantly reduced the need for physical testing. Alongside the help of programming languages, mathematical tools and libraries it is now possible to analyze the aerodynamic properties of the desired aircraft and its properties when in flight, more efficiently with less cost and less time.

Computational Fluid Dynamics

Computational Fluid Dynamics (CFD) has revolutionized aircraft engineering, with computer technologies and numerical methods, engineers can analyze aerodynamic behavior of different aircrafts, without using expensive physical testing. Using tools like OpenVSP, engineers can model complex aircraft geometries and analyze different aerodynamic characteristics, such as drag, lift, moments, pressures and so on. With parameters gained from CFD simulations we can create mathematical models for given aircraft. These mathematical models can be used to do precise calculations crucial for aircraft design. This saves both time and resources for the engineers.

Numerical methods and computer simulation

Understanding the flight characteristics enables engineers to optimize the aircrafts performance. This is quite hard to achieve with classical methods. On the other hand using computers to simulate flight

Пленарне засідання

with mathematical models obtained from computational fluid mechanics is quite optimal, cheap, and precise.

With the help of Python and different mathematics libraries like NumPy and SciPy we can implement numerical methods to analyze the flight characteristics of an aircraft. By using Euler method, Runge-Kutta Methods alongside simulating standard atmosphere model, we can fully simulate flight. We can obtain the trajectory, forces acting on an aircraft and velocities. All this enables engineers to fully simulate the flight with different scenarios, allowing them to optimize the aircraft in terms of every aspect, maneuverability, fuel consumption, flight time. With the simulations, engineers can also develop autopilots with the minimal amounts of physical testing.

Conclusion

With the new digital technologies engineering aerial vehicles has never been this optimized. We can practically fully simulate flight without heavy and expensive equipment. Minimizing cost and creating the best performing aircraft, alongside using the simulations to develop precise and powerful autopilot systems.

References

1. OpenVSP Documentation. Open Vehicle Sketch Pad. [Electronic resource]. – Available at: <https://openvsp.org/>
2. Python Documentation. Python Software Foundation. [Electronic resource]. – Available at: <https://www.python.org/doc/>

УДК 338:658.5

Шаповал А. С.
асп. НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна

Павленко Д. В.
д-р техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

**РОЗРОБКА МЕТОДИКИ АВТОМАТИЗАЦІЇ
ПРОЕКТУВАННЯ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ЗА
ДОПОМОГОЮ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ ПРОГРАМНИХ
КОМПЛЕКСІВ**

Проектування газотурбінного двигуна (ГТД) є складним ітеративним процесом. Оптимальність рішень, які приймаються на кожному етапі проектування, впливає на трудомісткість і якість результатів на наступних етапах, а також на необхідність проведення додаткових ітерацій вздовж всього шляху проектування.

Результати досліджень таких фірм, як «Boeing» [1], «PW&C» [2] та інших [3] підтверджують, що від рішень, які прийняті на першому етапі розробки ГТД – етапі попереднього проектування, залежить вигляд майбутнього двигуна і його компонентів, конструктивні особливості та відповідність вимогам технічного завдання, що впливає на видатки на наступних етапах проектування, та видатки під час виробництва і експлуатації вже спроектованого ГТД.

Розглянуто традиційний підхід до попереднього проектування ГТД, який являє собою ітеративне повторення термодинамічного (циклового) розрахунку двигуна та попередніх газодинамічних розрахунків компонентів двигуна. Наявність на цьому етапі великої кількості невідомих параметрів, які зазвичай визначаються на більш пізніх етапах проектування, та наявність взаємопов'язаних параметрів різних компонентів ускладнюють процес проектування [4]. Для вирішення цих проблем зазвичай використовують емпіричні данні та досвід розробки схожих двигунів та їх компонентів.

Альтернативою використанню емпіричних даних для розв'язання проблеми великої кількості невідомих параметрів, вимог і обмежень є використання оптимізаційних комплексів.

Аналіз наукових та науково-прикладних публікацій з відкритих джерел по темі застосування оптимізаційних комплексів на різних етапах проектування ГТД показав, що такі роботи зазвичай виконують для окремих модулів ГТД [2], [5], [6]. В результаті таких

Пленарне засідання

оптимізаційних робіт вдається покращити характеристики окремих компонентів двигуна. Але у деяких роботах [7], [8] зазначено, що для отримання покращених характеристик ГТД в цілому необхідні додаткові корегування циклових розрахунків та взаємна ув'язка усіх його елементів.

На основі проведеного аналізу пропонується новий, інноваційний підхід до попереднього проектування ГТД, який передбачає об'єднання циклового розрахунку двигуна з газодинамічними розрахунками його компонентів у єдину оптимізаційну задачу. При такому підході виконується не оптимізація параметрів кожного компонента окремо і пошук компромісів при поєднанні їх у складі двигуна, а оптимізація параметрів двигуна як єдиної системи взаємопов'язаних компонентів.

Для підтвердження можливостей нової методики пропонується розробити і застосувати нові підходи проектування для умовного ГТД та порівняти отримані результати, а також трудомісткість робіт з традиційним підходом. У якості можливого об'єкта дослідження пропонується турбореактивний двоконтурний двигун (ТРДД) з осевим вентилятором, кількома осевими і однією радіального ступенями компресора, кільцевою камерою згоряння, осевою турбіною компресора і турбіною вентилятора, яка має кілька осевих ступенів. Розробка методики на базі такого об'єкта дозволить створити універсальні схеми оптимізації типових елементів ГТД (ступінь осевого компресора/турбіни, ступінь радіального компресора та ін.), які в подальшому можуть бути використані для уніфікації запропонованого підходу з можливістю застосування для розробки ГТД будь якої конфігурації і складності.

Таким чином, на даному етапі роботи обґрунтована актуальність і перспективність даної теми та сплановані дії для подальшої роботи.

Список літератури

1. Turbomachinery Design Process Improvements Produce More Robust Machine. /Beatty R.F., Prueger G.H. AIAA 2000-3876, 36th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2000.
 2. Preliminary Multi-Disciplinary Optimization in Turbomachinery Design. / Panchenko, Y.; Moustapha, H.; Mah, S.; Patel, K.; Dowhan,
 3. Life-Cycle Costs and Economic Analysis./ Fabrycky W., Blanchard B. ISBN 0-13-538323-4, Prentice Hill, New Jersey, 1991.
- M.J.; Hall, D. In Proceedings of the RTO AVT Symposium, RTO-MP-089, 57/1-22, Paris, France, 22–25 April 2002

Пленарне засідання

4. Core Competency. Aviation Week&Space Technology, Sept.1, 2003.

5. Optimization of Compressor Variable Geometry Settings Using Multi-Fidelity Simulation. / Reitenbach, S., Schnoes, M., Becker, R.-G., and Otten, T., ASME, 2015, Paper No. GT2015-42832

6. Optimization Strategies Demonstrated on a Transonic Centrifugal Compressor. /Aulich, M., Voss, C., and Raitor, T. International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC), Honolulu, HI, Feb. 24–28 2014.

7. Direct Integration of Axial Turbomachinery Preliminary Aerodynamic Design Calculations in Engine Performance Component Models. / Kolias, I.; Alexiou, A.; Aretakis, N.; Mathioudakis, K. In Proceedings of the ASME Turbo Expo 2018, Oslo, Norway, 11–15 June 2018.

8. Optimization of an Engine With a Gear Driven Counter Rotating Fan-Part II: Cycle Selection and Performance. / Otten, T., Lengyel-Kampmann, T., Becker, R., and Reitenbach, S. 22nd International Symposium on Air Breathing Engines (ISABE), Phoenix, AZ, Oct. 25–30, 2015, Paper No. ISABE-2015-20090.

UDK 629:735.33

Mykhaylo Kybalnyy

Lead Designer of Experimental Design Bureau JSC “Motor Sich”,
Zaporizhzhia, Ukraine

Oleksii Prytula

Lead Designer of Experimental Design Bureau JSC “Motor Sich”,
Zaporizhzhia, Ukraine

Valentyn Pelykh

Master’s student of 102 dep., National Aerospace University “KhAI”,
Kharkiv, Ukraine

DETERMINING THE OPTIMAL LOCATION OF A STATIC PORT USING CFD METHODS

Onboard flight information support systems of the aircraft include a large number of various measuring instruments, the most important of which are the altitude and speed measuring devices [1]. Pitot-static system (PSS) is used to measure the air pressure during flight of the aircraft, which is essential for determining and calculating aerodynamic parameters for piloting and flight control, such as indicated airspeed, true airspeed, Mach number, vertical speed, and derivatives of these parameters [2]. With the development of computer technology, it became possible to predict the pressure distribution on the surface of an aircraft depending on the aircraft design, flight conditions and the aircraft state vector [3]. By calculating the pressure distribution over the aircraft body taking into account the change caused by the change in the angles of attack, slip angle, flight speed, the impact of disturbed air flows from the propeller, the Reynolds number, etc., it is possible to optimize the installation point of the PSS and give a theoretical calculation of the instrumental errors in the measured pressure tract, which then allows them to be programmatically compensated in the flight control computer (FCC) of the air data computer (ADC).

The optimal location for the static port will be a point on the fuselage with a near-zero pressure coefficient:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{q}, \quad (1)$$

where p – local pressure, [Pa]; p_∞ – pressure in undisturbed flow, [Pa];
 q – velocity pressure, [Pa].

By numerical modeling of various flight modes, distributions of the pressure coefficient over the aircraft surface were obtained, which were subsequently converted into aerodynamic speed error values.

Пленарне засідання

Using Kybalnyy-Prytula image overlay and normalization method, the data from the calculated modes are combined into a single figure with localization of zones for the possible installation of a static port that eliminates the influence of disturbed air flow in the previously considered flight modes (Fig. 1). The figure is made to scale, by parallel projection onto the plane of symmetry of the aircraft.

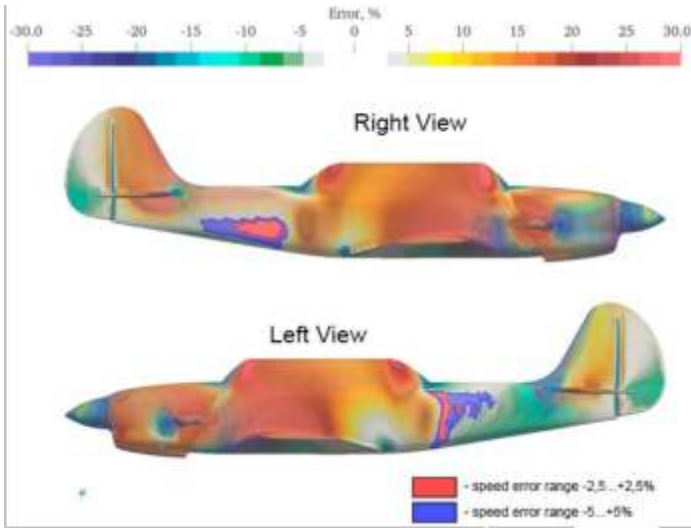


Figure 1 – Speed error distribution on the aircraft body

References

1. Popelka J. Pressure based reference system for aircraft attitude measurement [Electronic resource] / J. Popelka, P. Paces // In Proceedings 2013 IEEE/AIAA 32nd Digital Avionics Systems Conference (DASC), East Syracuse, NY. – 2013. – 4C4-1 – 4C4-14 – Mode of access: DOI: 10.1109/DASC.2013.6712588. (date of access: 01.11.2024). – Title from screen.
2. Петунин, А. Н. Методы и техника измерений параметров газового потока / А. Н. Петунин. – М : Машиностроение, 1996. – 380 с.
3. Кибальний М. Ю. Вплив кута встановлення повітряного гвинта на аеродинамічні характеристики літака / М. Ю. Кибальний, О. В. Притула, К. С. Ізвекова, А. П. Дьомін // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2023. – Т. 1, вип. 50. – С. 38–43. DOI: 10.30748/nitps.2023.50.04.

УДК 662.24:621.762:621.777:621.78

Біліонок Д. І.
інженер-технолог, ПАТ «Мотор Січ»,
м. Запоріжжя, Україна

Шило В. Г.
начальник бюро, ПАТ «Мотор Січ»,
м. Запоріжжя, Україна

Педаш О. О.
канд. техн. наук, начальник відділу досліджень, ПАТ «Мотор Січ»
м. Запоріжжя, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТАЛУРГІЇ ГРАНУЛ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ДИСКІВ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

Металургія гранул, що поєднує в собі виготовлення мікррозливків-гранул з високою швидкістю охолодження з наступною консолідацією процесом гарячого ізостатичного пресування, дозволяє досягти в сплаві щільної безпористої структури, уникнення дендритної й зональної ліквації, відсутності утворення пор, рихлот та мікротріщин. Окрім того, за допомогою металургії гранул є можливим отримувати заготовки деталей з мінімальними припусками під механічну обробку й тим самим забезпечуючи високий коефіцієнт використання матеріалу. Створення в гранулах бездефектної та безлікваційної структури, відповідно, чинить позитивний вплив на рівень механічних властивостей, жароміцності, опору втомі кінцевого виробу.

До дисків авіаційних двигунів висуваються вимоги щодо необхідного комплексу механічних та експлуатаційних характеристик, які включають опір високотемпературній повзучості та руйнуванню, високу високотемпературну міцність, тріщиностійкість, високу міцність при розтягненні, пластичність та опір малоциклової втомі.

Герметизовані заготовки, заповнені гранулами жароміцного нікелевого сплаву ЕП741НП (фракція гранул 50...140 мкм, виготовлених за технологією відцентрового плазмового розпилення) перевіряли на герметичність й піддавали гарячому ізостатичному пресуванню (ГП) на ізостатичному пресі Quintus.

В процесі ГП (при температурі $1200 \pm 10^\circ\text{C}$, з тиском 140 МПа та наступною витримкою 4–4,5 години) в герметизованих заготовках відбувалася консолідація порошків в єдиний монолітний матеріал.

Пленарне засідання

Скомпактовані заготовки були піддані механічній обробці, а також термічній обробці у вакуумній печі. Термічна обробка складалася з гартування при $1200\pm 10^{\circ}\text{C}$ протягом 4 год. з наступним прискореним охолодженням, а також потрійного старіння: при $910\pm 10^{\circ}\text{C}$ протягом 3 год., при $750\pm 10^{\circ}\text{C}$ протягом 8 год., при $700\pm 10^{\circ}\text{C}$ протягом 17 год.

З технологічного припуску заготовок було вирізано зразки для дослідження макро- та мікроструктури, короткочасних випробувань, довготривалої міцності, малоциклової втоми.

Результати досліджень показали, що макроструктура зразків характеризувалась рівномірною, дрібнозернистою будовою, величина макрозерна не перевищувала 1 мм. Дефектів металургійного походження не було виявлено.

Злами, досліджені на зруйнованих ударних зразках, внутрішньогранульні, ознак міжгранульного руйнування не виявлено.

Мікроструктура зразків являла собою γ -твердий розчин, що зміцнений інтерметалідною γ' - фазою з наявністю карбідів та карбонітридів, яка характерна для термообробленого жароміцного сплаву ЕП741НП. Мікроструктура характеризувалась дрібним, рівномірним зерном основного γ -твердого розчину.

Проведені ГП та термообробки сприяли майже повній відсутності мікропористості в зразках. В структурі також були виявлені границі окремих гранул, що допускаються НТД.

Рентгеноспектральним мікроаналізом на границях гранул виявили скупчення вторинних дрібнодисперсних карбідів титану, молібдену, вольфраму, ніобію, гафнію, що утворилися в процесі ГП та термообробки

За результатами контролю механічних властивостей, довготривалої міцності, МЦВ встановлено їх повну відповідність технічним умовам, відмічено тенденцію до забезпечення високого рівня дослідних властивостей.

UDK 629:735.4

Oleksii Prytula

Lead Designer of Experimental Design Bureau JSC “Motor Sich”,
Zaporizhzhia, Ukraine

Mykhaylo Kybalnyy

Lead Designer of Experimental Design Bureau JSC “Motor Sich”,
Zaporizhzhia, Ukraine

DETERMINATION OF NATURAL FREQUENCIES OF HELICOPTER ROTOR BLADES

In the process of manufacturing helicopter rotor blades, a very important aspect of production is the consistency of the technological process. The blades of the main or tail rotor in one set should be as similar to each other as possible in order to eliminate the phenomenon of weight and aerodynamic imbalance and thus not lead to undesirable phenomena of aeroelasticity [1, 3].

The determination of the natural frequencies of the blades is intended to minimize this drawback and identify design and manufacturing omissions that may affect the stiffness of the structure, thereby causing undesirable effects during helicopter operation [3].

During the study, the natural frequencies of the helicopter main rotor blades were determined experimentally and by calculation using finite element methods. A method for experimentally determining the natural frequencies of the helicopter main rotor blade was formulated and validated, which reflected the use of modern diagnostic methods [2, 3] as well as the available material and technical base.

The results of the experiment and the calculation by the numerical method (using the finite element method) were compared. Satisfactory agreement with experimental data was obtained.

Using the finite element method, the main forms of natural frequencies of the helicopter main rotor blade were obtained (Fig. 1), which simplified their identification during post-processing of the results of the full-scale experiment.

This study helped to detect hidden defects and eliminate them in a timely manner. The results were implemented in production.

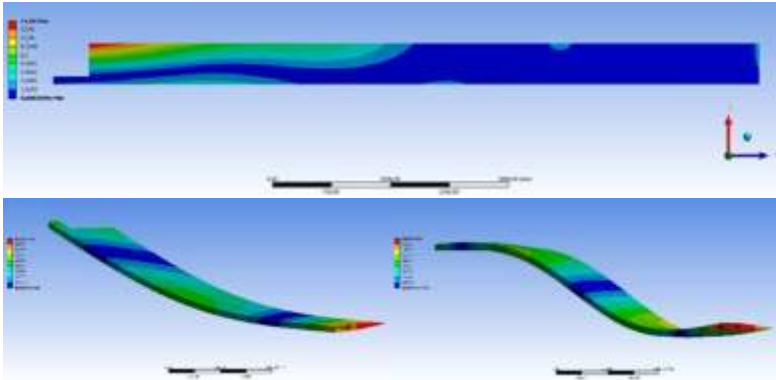


Figure1 – Numerical result of the calculations

References

1. Modal testing of the TX-100 wind turbine blade / Todd Griffith [et al.]. – Sandia National Laboratories: SANDIA REPORT, 2006. – 53 p. doi:10.2172/920816
2. Griffith D. T. Development of validated blade structural models / D. T. Griffith, J. A. Paquette, T. G. Carne // 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, [Nevada], 7–10 January 2008 / American Institute of Aeronautics and Astronautics. – Nevada, 2008. – P. 2–12.
3. Santos, dos F.L.M. Vibration-based damage detection for a composite helicopter main rotor blade [Electronic resource] / F.L.M. dos Santos, B. Peeters, H. Van der Auweraer, L.C.S. Góes, W. Desmet // Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing. – 2016. – Vol. 3, No. 1. – P. 22–27. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.csmssp.2016.01.001> (date of access: 28.06.2024). – Title from screen.

УДК 621.438.026.2

Двірник Я. В.
канд. техн. наук, доцент, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Есауленко С. В.
студ. гр. А-134.13 НУ «Запорізька політехніка»
м. Запоріжжя, Україна

МЕХАНІЗМИ ВИНИКНЕННЯ ТА РОЗВИТКУ ВТОМНИХ ПОШКОДЖЕНЬ НА ХВОСТОВИКАХ РОБОЧИХ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРА ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА З ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

Титанові сплави широко застосовуються в авіаційних двигунах завдяки їх високій питомій міцності, корозійній стійкості та жароміцності. Однак, ці матеріали схильні до втомного руйнування при тривалій експлуатації, що становить серйозну загрозу безпеці польотів. Розуміння механізмів втомного пошкодження титанових деталей є критично важливим для забезпечення надійності та довговічності авіаційної техніки.

Явище зменшення міцності деталей машин під дією циклічного навантаження було виявлене ще в середині XIX століття. Це послужило підставою створення нового напрямку науки про міцність матеріалів і конструкцій – втоми матеріалів [1].

Втомне руйнування відбувається при циклічному навантаженні тіла, температурному, силовому або вібраційному, в результаті накопичення в ньому незворотних ушкоджень, що призводять до утворення і розвитку тріщини.

Механізми втомного руйнування

Процеси втомного руйнування титанових деталей авіадвигунів можна умовно розділити на три основні етапи: зародження втомних тріщин; поширення втомних тріщин; руйнування при досягненні критичного розміру тріщини.

Інкубаційний період розвитку руйнування характеризується скупченням дефектів, зародженням дислокацій, їх рухом, виникненням дислокаційних петель після проходження дислокацій через потенційні силові бар'єри решітки, що створюються силами внутрішньої взаємодії між атомами, молекулами, зернами тощо, виникненням ліній ковзання, об'єднанням цих ліній у смуги ковзання

Пленарне засідання

і, нарешті, виникненням певної структури тіла з переважною орієнтацією зерен і зрушеннями по площадках ковзання [2].

При достатній кількості дислокацій у центрі їх скупчення утворюється мікро-дефект, у який «звалюються» всі дислокації скупчення. Цей механізм пояснює вибуховий характер виникнення мікродефектів типу субмікроскопічних і мікроскопічних тріщин відразу значних розмірів у порівнянні з розмірами атомів.

Як правило, пружне циклічне деформування тіла призводить до зародження і зростання тріщин без утворення скільки-небудь значної зони пластичних деформацій навколо вершини тріщини, тобто втомне руйнування тіл відбувається без спотворення їх форми і зміни розмірів і носить крихкий характер. Воно зумовлено структурною неоднорідністю тіла, що полягає у випадковому розподілі розмірів зерен, напрямків їх кристалографічних площин, у наявності різних фаз, включень, дефектів кристалічної решітки. У зернах, несприятливо орієнтованих до зовнішнього навантаження, виникають лінії зсуву в результаті руху та об'єднання дислокацій по певних кристалографічних площинах вже на ранній стадії [3].

Зокрема втомним руйнування піддаються хвостовики робочих лопаток компресору авіаційних двигунів. Замкові з'єднання лопаток компресора типу ластівчиного хвоста піддаються дії статичного розтягування від відцентрових зусиль, статичного вигину від газового навантаження та змінного вигину головним чином від коливань лопатки за основним тоном. Напруженість замкового з'єднання залежить від нерівномірності розподілу напруг по ширині хвостовика. Починається руйнування найчастіше на тих ділянках робочої грані хвостовика, де концентрація напруг найбільш несприятливо поєднується із загальною нерівномірністю розподілу напруг. Крім того, у місці контакту робочої грані з диском діє корозія тертя, що руйнує поверхневі шари металу.

Методи підвищення втомної довговічності

Для запобігання втомному руйнуванню титанових деталей авіадвигунів застосовуються такі підходи [4, 5]: вдосконалення конструкції; поверхнева обробка; термічна обробка; легування та мікролегування; комбіновані методи.

Систематизація знань про механізми втомного пошкодження титанових деталей авіаційних двигунів дозволяє комплексно підходити до вирішення проблеми забезпечення їх надійності та довговічності. Розуміння впливу різних факторів на процеси зародження, поширення та руйнування за втомою є ключовим для

Пленарне засідання

розробки ефективних інженерних рішень, спрямованих на підвищення безпеки польотів.

Список літератури

1. П. В. Ясній. Пластично деформовані матеріали: втома і тріщиноотривкість. – Львів : Світ, 1998. – 224 с.
2. Опір матеріалів з основами теорії пружності й пластичності. В. Г. Піскунов, В. С. Сіпетов, В. Д. Шевченко, Ю. М. Федоренко. – Вища школа, 1995. – 271 с.
3. С. С. Дяченко. Фізичні основи міцності та пластичності металів : навч. посібник. – Харків : Видавництво ХНАДУ, 2003. – 226 с.
4. Ritchie, R.O. (1999). Mechanisms of fatigue-crack propagation in ductile and brittle solids. International Journal of Fracture, 100(1), 55–83.
5. Dowling, N.E. (2013). Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. Pearson. – 912 с.

UDK 629.735

Valentyn Pelykh

Master's student of 102 dep., National Aerospace University “KhAI”,
Kharkiv, Ukraine

Mykhaylo Kybalnyy

Lead Designer of Experimental Design Bureau JSC “Motor Sich”,
Zaporizhzhia, Ukraine

**DETERMINATION OF THE OPTIMAL VALUE OF
TIGHTENING FORCE FOR BUSHINGS OF A BLADE ROOT
CUFF ATTACHMENT OF A TRANSPORT HELICOPTER**

In paper [1], it was determined that an increase in the tightening force relieves the fastening holes, since most of the power flows begin to be transferred by friction between the lug of the blade root cuff attachment (BRCA) and the spar.

The contact pressure in the sleeve-hole pair is calculated according to [2], taking into account the configuration of the BRCA, the hole in it can be considered similar to that in a thick-walled pipe [3].

The optimum tightening force condition for a real structure can be represented as a function of the minimum stress in the energy theory of joint gap strength.

Solving the system of equations, we get the function (Fig. 1):

$$F = f(q), \quad (1)$$

F – tightening force; q – gap in the joint.

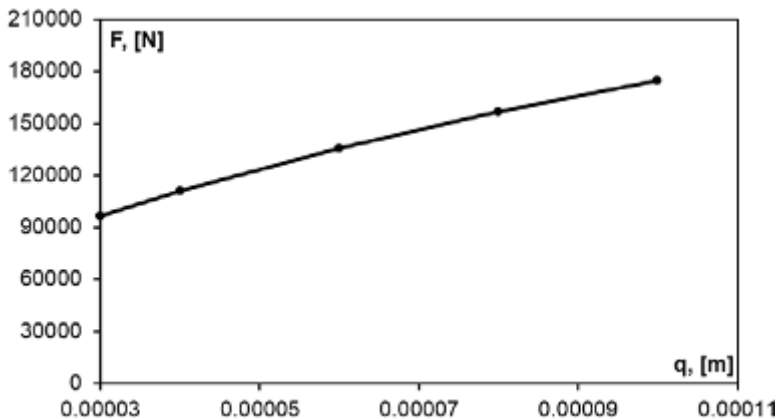


Figure 1 – Analytical calculated value of required tightening force

Конструкція і міцність

The value of the required force varies in the range of 100,000-170,000 N, which is comparable to the range obtained in [1] by CAE modeling.

An important issue is to ensure close contact with the initial nominal gaps in the BRCA-spar pair. The nominal value on the original design was up to 2 mm. Modeling of the BRCA with a test load of 10,000 N (Fig. 2) on one sleeve indicates the smallest deflection in the contact zone of 0.2 mm, accordingly, already at a value of 100,000 N, all gaps are closed.

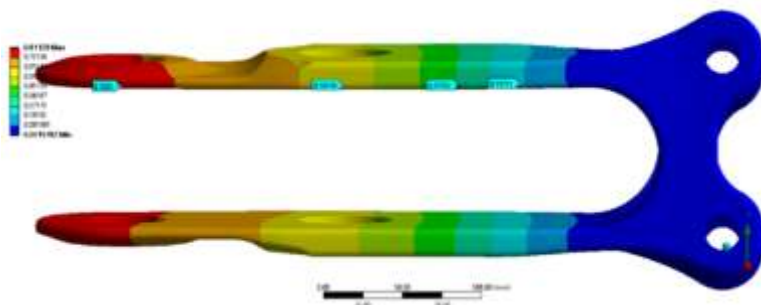


Figure 2 – FEA BRCA deflections modeling

The values obtained in the paper should be checked during the tests of the modernized blade. The tightening torque on the key should be determined taking into account the actual parameters of the sleeve, nut and type of lubricant.

References

1. Pelykh V. Transport helicopter root cuff attachment modernization concepts [Electronic resource] / Valentyn Pelykh, Mykhaylo Kybalnyy, Sergii Degtiarenko // Science and Technology of the Air Force of Ukraine. – 2024. – Vol. 54, no 2. – P. 23–31. – Mode of access: <https://doi.org/10.30748> (date of access: 06.11.2024). – Title from screen.
2. Johnson L. K. Contact mechanics / K. L. Johnson – Cambridge [Cambridgeshire]: Cambridge University Press, 1987. – 452 p.
3. Dybyr A. H., Makarov O. V., Pekelnyi N. I., Yudin H. I., Grebennikov M. N. Practical calculations on the strength of structural elements. Part I: Textbook. – Kharkiv: National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», 2007. – 102 p.

УДК 621.45.037

Собченко С. В.
аспірант кафедри ТАД НУ «Запорізька Політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна
Уланов С. О.
доктор філософії, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

АНАЛІЗ ВИНИКАЮЧИХ НЕВІДПОВІДНОСТЕЙ НА СТАТОРІ КОМПРЕСОРІВ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Осьовий компресор є одним із основних вузлів газотурбінного двигуна, який забезпечує підвищення тиску повітря, складається з статора і ротора. В свою чергу статор компресора складається з корпусу компресора, направляючого апарата (НА) і робочих кілець. Лопатки НА забезпечують направлення повітряного потоку, який проходить крізь них, під необхідним кутом на лопатки розташованого за ним робочого колеса ротора і випрямлення повітряного потоку з одночасним перетворенням частини кінетичної енергії закрученого потоку в роботу підвищення тиску повітряного потоку. При цьому лопатки статора під дією нерівномірного потоку повітря відчувають коливання, які можуть привести до пошкодження або руйнуванню, що призведе до руйнування всього двигуна.

Внутрішні поверхні робочих кілець та корпус компресора зазвичай покривають покриттям, що припрацьовується. Це покриття служить для захисту поверхонь від різних фізичних впливів (знос, високі температури, тощо), а також дозволяє зменшити радіальні зазори між торцями робочих лопаток ротора і статора.

Аналізуючи пошкодження, можливо поділити їх на декілька категорій:

1. Дефекти НА, які утворились в процесі виготовлення, наприклад внутрішня тріщина, що в процесі експлуатації сприяла відриву лопатки. Що стосується покриття, що припрацьовується, так це неякісне нанесення цього покриття, або неправильно підібраний хімічний склад покриття.

2. Невідповідності, які виникають в процесі експлуатації - наприклад потрапляння сторонніх предметів, потрапляння птаха, або заклепки повітрязабірника, що призводить до повного, або часткового руйнування компресора авіаційного двигуна.

3. Пошкодження, які підпорядковуються закону розподілення – наприклад внаслідок стирання, або корозії поверхневого шару лопаток.

Конструкція і міцність

Поліпшення матеріалів для статора і покриття, що припрацьовується може зменшити ризик виникнення невідповідностей та підвищити надійність компресорів.



Рисунок 1 – Невідповідність на лопатка НА компресора високого тиску



Рисунок 2 – Вирив покриття, що припрацьовується

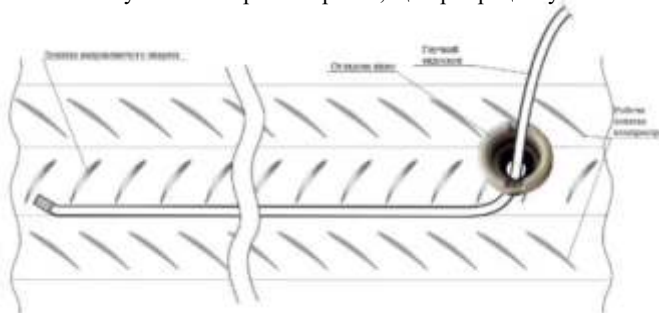


Рисунок 3 – Огляд відеоскопом лопаток НА

Конструкція і міцність

УДК 669.056.9

Голтвяниця В. С.

канд. техн. наук, доцент, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Домніч І. С.

інженер дослідник I кат., ННЦ «Харківський фізико-технічний
інститут» НАН України,
м. Харків, Україна

Задніпровський Ю. О.

канд. техн. наук, ННЦ «Харківський фізико-технічний
інститут» НАН України,
м. Харків, Україна

ВАКУУМНО-ДУГОВІ (Ti-Cr)N ПОКРИТТЯ ДЛЯ ЗАХИСТУ ПОВЕРХНІ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Синтез багатокомпонентних покриттів на основі сполук Me-N з високими експлуатаційними характеристиками є сучасним напрямком для підвищення надійності літальних апаратів. Сьогодні жорсткі умови експлуатації, наприклад, лопаток авіаційних газотурбінних двигунів потребують створення новітніх захисних матеріалів – багатокомпонентних наноструктурних покриттів [1]. Для поліпшення експлуатаційних характеристик конструкційних матеріалів, що використовуються для виробництва лопаток авіаційних ГТД та газотурбінних установок наземного використання, представляє інтерес осадження на їхні робочі поверхні захисних вакуумно-дугових багатокомпонентних покриттів з вмістом Cr. Ці покриття характеризуються підвищеними твердістю (≥ 35 ГПа), зносостійкістю, високою корозійною стійкістю та термічною стабільністю [2]. Проте, осадження (Me-Cr)N покриттів відрізняється невеликими швидкостями (до 5 мкм/год), що відбувається в основному через високий коефіцієнт розпилення хрому. «Збіднення» покриттів тим чи іншим металевим компонентом може залежати від багатьох параметрів процесу осадження, починаючи з краплинної складової, тиску робочого газу азоту та енергетики іонів, що залежить від величини потенціалу зміщення на підкладку. Проведені дослідження були спрямовані на визначення параметрів синтезу наноструктурних покриттів на

Конструкція і міцність

основі Ti-N з метою визначення оптимального, з погляду підвищення службових характеристик, вмісту добавки Cr.

Осадження CrN, (Ti-Cr)N покриттів проводилося на вакуумно-дуговій установці із застосуванням джерел плазми з магнітним утриманням катодної плями та фокусуванням плазмового потоку. Для синтезу покриттів використовувались однокомпонентні Ti катоди зі сплаву BT1-0, катоди із Cr (99,9 %), а також двокомпонентні катоди Ti-Cr, отримані вакуумно-дуговою плавкою з 23 % і 32 % ваговою домішкою хрому. Отримані залежності концентрації хрому $C_{Cr} = f(P_{N_2})$ та мікротвердості $H_\mu = f(P_{N_2})$ від тиску азоту, які характеризуються екстремальною поведінкою, дозволили одержати (Ti-Cr)N покриття з високими механічними характеристиками. Показано, що величина H_μ покриттів знаходиться в прямій залежності від величини C_{Cr} концентрації в них хрому. За допомогою досліджень концентрації хрому в залежності від потенціалу зміщення $C_{Cr} = f(U)$ отримані (Ti-Cr)N покриття з високим вмістом Cr (до 20 ваг. %). Досліджено фазовий склад та мікроструктуру покриттів та визначено її вплив на службові характеристики. В указаному діапазоні тисків азоту при використанні катоду Ti-32Cr отримані наноструктуровані покриття, в яких виявлені кристалічні $(Cr,Ti)_2N$ сполуки, розмір ОКР яких складає ~ 6 нм. Під час порівняльних лабораторних випробувань на абразивне зношування покриття (Ti-12Cr)N продемонструвало стійкість у 5 разів вищу, ніж TiN і в 70 разів – ніж CrN.

У роботі показана перспективність використання катодів із титанохромових сплавів для нанесення наноструктурних покриттів з високими механічними властивостями. Розроблені (Ti-Cr)N покриття можуть бути використані для збільшення ресурсу конструкційних матеріалів літальних апаратів.

Список літератури

1. Абразивна та кавітаційна стійкість TiN покриттів легованих Al, Si, Y [Електронний ресурс] / [авт. кол.: Білоус В.А., Василь'єв В.В., Голтвяниця С.К. та ін.] // Вісник двигунобудування. – 2012. – №1. – С. 201–205. – Режим доступу до журн.

<https://vd.zntu.edu.ua/article/view/97745/93090>

2. Lattice matching growth of high anti-corrosion TiCr/TiCrN coating for Ti bipolar plate / Yigang Yan, Tao Li, Hanyi Zhang, Yungui Chen, Tuan Zhang [Електронний ресурс] // Journal of Power Sources. – 2024. – Vol. 614, 235051. – Режим доступу до журн.

<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.235051>

УДК 621.45:539.3

Ратинський А. В.
аспірант відділу коливальних і вібраційної надійності
Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України,
м. Київ, Україна

Деркач О. Л.
канд. техн. наук, ст. досл.,
зав. відділу коливальних і вібраційної надійності,
Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України,
м. Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОТОВЩЕННЯ ОБОДА НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ДИСКА КОМПРЕСОРА АВІАЦІЙНОГО ГТД

Аналіз експериментальних та розрахункових досліджень напружено-деформованого стану (НДС) дисків компресора авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) та їх експлуатація показує, що найбільш небезпечним дефектом є виникнення тріщини в замковому з'єднанні лопаток з диском типу «ластівчин хвіст» [1]. Метою роботи є побудова скінченно-елементних (СЕ) моделей робочого колеса 1 ст. компресора низького тиску (КНТ) авіаційного ГТД для визначення впливу потовщення обода на НДС дисків з урахуванням пружно-пластичних властивостей матеріалу.

Розрахункові дослідження статичного НДС диска проведено методом скінченних елементів у циклічно симетричній постановці з урахуваннями дії відцентрових сил, контактної взаємодії диска з лопаткою та пружно-пластичних властивостей матеріалу, що описані білінійною моделлю. Аналіз НДС проводився для максимального режиму згідно технічних характеристик КНТ.

СЕ модель періоду робочого колеса КНТ диско-барабанної структури показано на рис. 1а. Розглянуто дві модифікації робочих коліс КНТ, що відрізняються товщиною диска в 1,36 раза (рис. 1б). Для побудови регулярної СЕ сітки лопатки, диска та фрагмента барабана їх геометричні моделі були розділені на декілька частин. В околі з'єднання лопаток з диском було використано підхід субмоделювання [2], що дозволило отримати оптимальну сітку в околі критичних зон диска (рис. 1а).

Встановлено параметри сітки для яких подальше збільшення незначно впливає на максимальні напруження. Так показано, що при збільшенні кількості елементів в замковому пазі у 1,5 раза, а також -

Конструкція і міцність

по глибині паза в 1,25 раза максимальні напруження відрізняються менш ніж на 1 %.

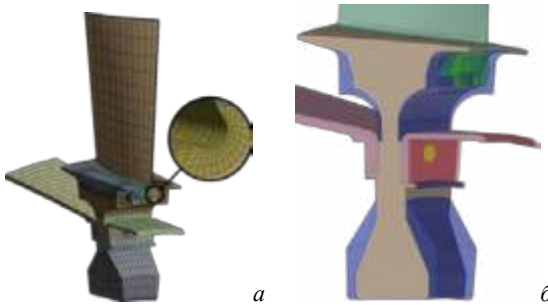


Рисунок 1 – СЕ модель періоду диска компресора (а) та його двох модифікацій, що відрізняються товщиною (б)

За результатами аналізу НДС у вихідному (тонкому) диску були визначені ділянки пластичних деформацій, тоді як в потовщеному диску таких деформацій не спостерігалось. Аналіз НДС у пазовій впадині диска показав, що потовщення обода диска в 1,36 раза дозволяє зменшити максимальні еквівалентні напруження на 7,4% (рис. 2). Розроблену СЕ модель також було використано для подальшого модального та гармонічного аналізу.

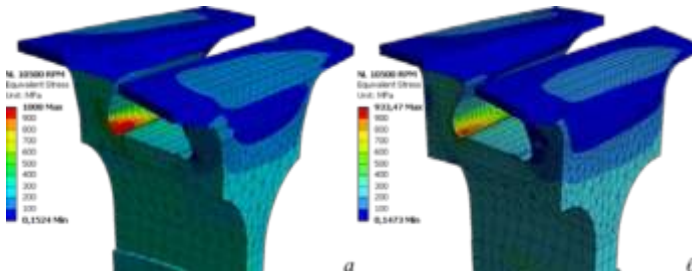


Рисунок 2 – НДС у вихідному (а) і потовщеному (б) дисках

Список літератури

1. Михайленко А. Н. Увеличение ресурса титановых дисков компрессоров / А. Н. Михайленко, Т. И. Прибора // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 3. – С. 75–79.
2. Шереметьев А. В. Анализ использования результатов субмоделирования при определении напряженно-деформированного состояния и ресурса деталей авиационных ГТД / А. В. Шереметьев, Т. И. Прибора, В. В. Тихомиров // Вестник двигателестроения. – 2015. – № 2. – С. 52–57.

Тумарченко Л. О.
аспірантка, НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна

АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ У ВИРОБНИЦТВІ ТА ВІЙСЬКОВОМУ СЕКТОРІ

Сучасні виробничі галузі потребують високоякісних і водночас недорогих деталей з відповідними механічними характеристиками. Хоча субтрактивні технології мають більше промислове значення завдяки їх адаптованості до масового виробництва, нові технології адитивного виробництва (AM) можуть значно знизити витрати на розробку продукту, прототипування, верифікацію дизайну і виготовлення індивідуальних деталей. Особливо актуальним є застосування AM у військовій сфері, де складні деталі та компоненти важливо виробляти швидко, зокрема в польових умовах.

Адитивні технології дозволяють обробляти різні матеріали, включаючи полімери, метали, кераміку та їх комбінації. Однією з найпоширеніших і економічних технологій є Fused Deposition Modeling (FDM), яка використовує термопластичні матеріали, такі як PLA, ABS, ПEEK, нейлон та ін. Нейлон особливо популярний у виробництві FPV-дронів завдяки міцності, легкості та ізоляційним властивостям. Наприклад, нейлонові пропелери та стійки допомагають підвищити продуктивність дронів.

Однак механічна міцність деталей, надрукованих методом FDM, нижча в порівнянні з деталями, виготовленими традиційними методами виробництва через наявність порожнеч і слабший зв'язок між шарами та растрами [1]. Для підвищення якості продукції використовують методи оптимізації параметрів друку, додавання наповнювачів в матеріал та постобробку. Наприклад, термічна обробка ефективно зміцнює надруковані вироби, зменшуючи внутрішні напруження в матеріалі.

Таким чином, адитивне виробництво демонструє значний потенціал як у промисловості, так і у військовій сфері, хоча для досягнення максимальних результатів потрібна подальша оптимізація технологічних процесів.

Список літератури

1. Adanur S. Additive manufacturing of interlaced fibrous structures / Adanur S., Jayswal A. // Rapid Prototyping Journal. – 2021. – Vol. 27. – P. 671–681.

УДК 629.7.036.3

О. В. Горідько
Заступник головного конструктора УГК, АТ «Мотор Січ»,
м. Запоріжжя, Україна

Т. П. Михайленко
канд. техн. наук., доцент НАУ «ХАІ», м. Харків, Україна

І. І. Петухов
канд. техн. наук, доцент НАУ «ХАІ», м. Харків, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ОХОЛОДЖЕННЯ ОЛИВИ В АВІАЦІЙНОМУ ДВИГУНІ З УРАХУВАННЯМ ДВОФАЗНОГО СЕРЕДОВИЩА

В авіаційних газотурбінних двигунах (ГТД) система охолодження оливи відіграє ключову роль, оскільки температура робочої рідини суттєво впливає на надійність та довговічність роботи двигуна. Масляна система забезпечує подачу оливи до вузлів тертя для їхнього змащення та відведення тепла. Однак охолодження оливи в авіаційних двигунах має свої особливості, які пов'язані з наявністю двофазного середовища – суміші оливи та повітря, що впливає на умови теплопередачі.

Однією з ключових особливостей охолодження оливи в двофазному середовищі є знижений коефіцієнт теплопередачі, викликаний присутністю повітря. Повітря, потрапляючи в оливу через зазори в ущільненнях, утворює суміш, де частина повітря розчинена, а інша циркулює у вигляді бульбашок. За таких обставин ефективність теплообміну знижується через погіршення умов тепловіддачі біля теплообмінної поверхні маслорадіатора, що потребує додаткових інженерних рішень для оптимізації охолодження.

В авіаційних маслосистемах найчастіше використовуються рекуперативні теплообмінники, де охолоджувальним середовищем виступають повітря або паливо, яке подається з паливної системи двигуна. Такі теплообмінники можуть бути як паливо-масляними, так і повітряно-масляними. Паливно-масляні теплообмінники, окрім охолодження оливи, також виконують функцію підігріву палива, що підвищує його випаровуваність при подачі в камеру згоряння. Для інтенсифікації теплопередачі та мінімізації габаритів маслорадіаторів застосовуються поверхні з ребрами, які збільшують площу контакту та покращують тепловіддачу.

В умовах двофазного потоку бульбашки повітря нерівномірно розподіляються в оліві, що призводить до складних теплогідравлічних процесів. Можуть виникати критичні режими течії в каналах радіатора

Конструкція і міцність

при значно нижчих швидкостях потоку ніж для однофазного середовища. Це особливо характерно для турбовальних двигунів, де статичний сепаратор, що відокремлює повітря від оливи, встановлено після маслорадіатора. Така специфіка вимагає ретельного підходу при проектуванні маслорадіаторів, оскільки традиційні методи розрахунку, засновані на однофазному середовищі, не є відповідними для двофазних потоків.

Таким чином, проектування та моделювання маслорадіаторів для авіаційних ГТД з урахуванням двофазного середовища стає необхідною умовою для підвищення надійності та ефективності системи охолодження. У дослідженні, використовуючи теорію механіки багатофазних середовищ, розглядаються підходи до моделювання процесу охолодження оливи в маслорадіаторі. Проведений аналіз сучасних підходів демонструє напрямки для подальших досліджень, спрямованих на підвищення якості проектування маслорадіаторів.

УДК 621.45.036

Сбродов Є. В.
провідний інженер-дослідник, ДП «Івченко-Прогрес»
м. Запоріжжя, Україна
аспірант, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Юзефович Р. М.
доктор техн. наук, проф.,
Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України,
м. Львів, Україна

ВІБРОДІАГНОСТИКА АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ МЕТОДОМ ПЕРІОДИЧНО НЕСТАЦІОНАРНИХ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ

Вібраційна діагностика є одним з ефективних і надійних інструментів для забезпечення безпеки, надійності та економічності експлуатації авіаційних двигунів, основною задачею якої є виявлення несправностей, які ще не призвели до відмов або аварій. Аналіз ознак дефектів і оцінка їх розвитку ґрунтуються на ретельному дослідженні структури вібраційного сигналу з урахуванням особливостей діагностованого двигуна. Для опису такої структури необхідно використовувати математичну модель сигналу, яка містить набір характеристик, що дозволяють оцінити технічний стан механізму. Серед ключових властивостей вібраційного сигналу авіаційного двигуна виділяються його повторюваність, пов'язана з циклічним характером роботи обертових деталей та вузлів, і стохастичність, яка зумовлена випадковими змінами: зміни навантаження, коливання параметрів мастильного шару, зміни сил тертя, зміни жорсткості опор, а також турбулентність та інші випадкові фактори.

Методи вібраційної діагностики, розроблені у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України [1] на основі моделей сигналів у вигляді періодичних та майже періодичних випадкових процесів, у тому числі виділення і спектрально-кореляційного аналізу модулюючих стаціонарних компонентів, з якими пов'язані важливі дані про характер та ступінь розвитку дефектів, забезпечують проведення широкого комплексу статистичних досліджень властивостей вібраційних сигналів.

При представленні вібраційного сигналу у вигляді періодично нестаціонарних випадкових процесів (ПНВП) його імовірнісні

Конструкція і міцність

характеристики: математичне сподівання (1), автокореляційна функція (2) і спектральна густина (3) є періодичними функціями в часі

$$m(t) = E\xi(t) = \overset{\circ}{m}(t+T), \quad \overset{\circ}{\xi}(t) = \xi(t) - m(t), \quad (1)$$

$$b(t, u) = E \overset{\circ}{\xi}(t) \overset{\circ}{\xi}(t+u) = b(t+T, u), \quad (2)$$

$$f(\omega, t) = f(\omega, t+T). \quad (3)$$

де E – оператор математичного сподівання.

Математичне сподівання $m(t)$ описує детерміновані періодичні коливання; кореляційна функція $b(t, u)$ характеризує періодичну мінливість t кореляційних зв'язків між значеннями стохастичної складової сигналу, розділеними часовим інтервалом u ; спектральна густина $f(\omega, t)$ – розподіл потужності випадкової складової коливань на площині “частота-час”.

Визначення періоду кореляції ПНВП є необхідною умовою для оцінки його імовірнісних характеристик. Точність визначення періоду, отримана виходячи з технічних характеристик двигуна, не задовольняє вимогам стохастичної обробки реалізацій сигналів методами ПНВП. Крім того, значення періоду може бути окремим діагностичним параметром. Попередні дослідження [1] показали, що необхідні методи можуть бути створені на основі аналізу часової мінливості оцінок характеристик першого та другого порядку вібраційного сигналу [2]. Постановка задачі виявлення прихованих періодичностей в термінах стохастичного оцінювання ймовірнісних характеристик ПНВП дозволяє усунути існуючі протиріччя традиційних підходів, розділивши пошук детермінованих періодичних коливань і закономірностей періодичної мінливості флуктуаційних процесів.

Список літератури

1. Яворський І. М. Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань. Під редакцією академіка НАН України З.Т. Назарчука. Львів, Україна: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2013.

2. Method for analysis of periodically non-stationary properties of vibrations for a gas-turbine engine with unbalanced rotor / Yuzefovych R. M., Torba Yu. I., Javorskyj I. M. et al. // Proceedings of International Conference “Welding and Related Technologies” (WRT 2024), Yaremche, Ukraine, 7–10 October 2024.

УДК 658.788

Котов О. Б.
д-р техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Лівертоський М. І.
аспірант НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

АСПЕКТИ ПРОЕКТУВАННЯ СИЛОВИХ УСТАНОВОК БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Розвиток безпілотних авіаційних комплексів (БпАК) у сучасному суспільстві відіграє важливу роль у різних сферах життєдіяльності людства. Разом з тим, розвиток та застосування сучасних передових технологій прискорює процеси проектування, конструювання та створення сучасних і перспективних силових установок для майбутніх безпілотних літальних апаратів (БпЛА) України та країн світу.

На кожному етапі має здійснюватися відповідна система послідовних дій у виконанні проекту, які називаються стадіями.

Початковий етап проектування – організаційно-підготовчий, на якому постає важливе завдання – правильно обрати об'єкт проектування, адже від цього суттєво залежить успіх подальшої роботи. На цьому етапі необхідно досконало з'ясувати і поставити проблему, усвідомити значення майбутнього виробу як для самого себе, так і загалом для суспільства, тобто визначитись у доцільності розгортання та виконання проекту.

Наступний етап проектування БпАК – конструкторський. Під час цього етапу проектувальники складають ескізи можливих варіантів майбутнього виробу, здійснюють функціональний і композиційний аналіз, на основі чого вибирають оптимальну форму чи конструкцію виробу, добирають матеріали та інструменти, визначають найдоцільнішу технологію виготовлення обраної конструкції, виконують економічні, екологічні та міні-маркетингові дослідні розрахунки та вносять відповідні корегування.

Між тим, конструкторський етап містить такі стадії як: складання ескізних варіантів, розроблення конструкторське – технологічної документації, добір матеріалів, вибір інструментів та обладнання, вибір технології обробки деталей виробу та їх з'єднання, обробка майбутнього виробу, економічне й екологічне обґрунтування, міні-маркетингові дослідження.

Конструкція і міцність

В цих стадіях «червоною рисою» повинно проходити визначення доцільності виготовлення проекту з погляду економії матеріалів та енергоресурсів для його виготовлення. Отже, потрібно знаходити раціональні конструкції, проявляти заповзятість, спритність, кмітливість, щоб виготовити корисну річ з мінімальними матеріальними витратами, з недорогих матеріалів і водночас наділити її низкою переваг.

У проспекті творчого проекту на цьому етапі потрібно подати обґрунтування витрат необхідних матеріалів, засобів, енергії для виготовлення виробу; визначення його собівартості та ціни, передбачуваних прибутку і можливих термінів реалізації. Наступним моментом цього етапу є екологічна експертиза, де потрібно подати повну характеристику щодо екологічної безпеки виготовлення, не менш важливим є також обґрунтування використаної сировини.

На третьому етапі проектування БпАК – технологічному, виконуються заплановані операції, здійснюються заходи самокон-тролю та оцінки якості виробу. Засобами є інструменти та обладнання, що заплановані й передбачені у змісті технологічного процесу.

Цей не менш важливий етап проектування БпАК складається з низки наступних обов'язкових стадій, а саме: виконання операцій, передбачених технологічним процесом, самоконтроль діяльності; дотримання технологічної, трудової дисципліни, культури праці.

На завершальному етапі проектування БпАК здійснюється кінцевий контроль, порівняння і випробування проекту, виготовлену конструкцію порівнюють із замовленою. Виявлені в ході випробувань зразка силової установки недоліки та неполадки оперативне усуваються. Виконана робота аналізується, з'ясовується досягнення мети у результаті праці, проводиться самооцінку спроектованого зразка виробу. Ще на початку роботи слід визначити, який проект буде виконуватися – індивідуальний чи груповий. Якщо проект виконується парою або групою, то вони формуються за інтересами, розподіляються ролі й завдання відповідно до рівня знань, бажаної практичної діяльності в проекті.

Як відомо, в основі проекту лежить певна проблема, щоб її вирішити, людина повинна мати знання з різних галузей науки, а також володіти певними вміннями: інтелектуальними (робота з інформацією, її аналіз, узагальнення і висновки), творчими, комунікативними.

Варто пам'ятати, що кожен виріб або послугу можна виконати різними способами. Тому, перш ніж розпочати практичне виконання проекту, потрібно переконатись у тому, що обраний варіант найбільш технологічний, економічний, екологічний, відповідає вимогам дизайну, найбільше задовольняє вимоги суспільства та конкурентоздатний на світовому ринку реалізації.

УДК 621.44.533.697

Шакало Р.Ю.
керівник групи відділу компресорів ДП «Івченко-Прогрес»,
м. Запоріжжя, Україна

Ларін О.О.
доктор наук, директор ННІФІ, НТУ «ХПІ»,
м. Харків, Україна

Савченко К.В.
кандидат техн. наук, старший науковий співробітник,
Інститут проблем міцності ім. Писаренка, м. Київ, Україна

**РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ
ВПЛИВУ ПОЧАТКОВОГО ПАРАМЕТРУ СПРЯЖЕННЯ
БАНДАЖНИХ ПОЛИЦЬ ПОПАРНО БАНДАЖОВАНИХ
ЛОПАТОК НА СТАТИЧНІ НАПРУЖЕННЯ
У ПЕРІ ЛОПАТКИ**

В роботі розглядаються результати експериментального дослідження впливу початкового параметру спряження бандажних полиць попарно бандажованих робочих лопаток на статичні напруження у кореновому перерізі пера лопаток, а також порівняння отриманих результатів з розрахунковими даними. Експериментальні дослідження проводились на установці, створеній в Інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України. Для проведення розрахунків розроблено тривимірні скінченноелементні моделі попарно бандажованих робочих лопаток. З метою верифікації розроблених моделей для кожної лопатки виконано модальний аналіз для визначення власних частот коливань та проведено порівняння з експериментальними даними, отриманими при виготовленні лопаток. Проведено аналіз розрахунково-експериментальних досліджень впливу початкового параметру спряження на статичні напруження у кореновому перерізі пера лопаток. Встановлено, що зі збільшенням початкового параметру спряження статичні напруження у кореновому перерізі лопаток збільшуються прямопропорційно. Існує суттєва похибка між експериментальними та розрахунковими значеннями, при цьому характер залежності напружень від початкового параметру схожий – прямолінійний (рис. 1). Похибка між експериментальними та розрахунковими значеннями пояснюється тим, що при виготовленні лопаток мають місце відхилення від номінальних розмірів, а моделі побудовано по номінальним розмірам.

Конструкція і міцність

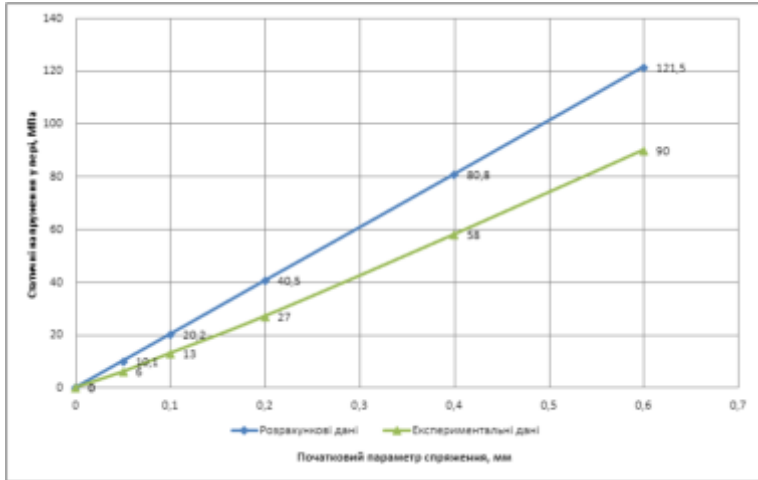


Рисунок 1 – Залежність статичних напружень згину $\sigma_{ст}$ від початкового параметру спряження Δn лівої лопатки АГТД Д-36

Список літератури

1. Дослідження впливу гнучкості пера на оптимальні умови спряження полиць попарно бандажованих лопаток турбін / А. П. Зінковський та ін. Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2020. – № 7. – С. 41–49.
2. Демпфирование колебаний охлаждаемых попарно бандажированных рабочих лопаток турбин / Р.Ю. Шакало и др. Авиационно-космическая техника и технология. – 2019. – № 7. – С. 109–113.
3. Моделирование контактного взаимодействия и расчет напряжений в зоне контакта бандажных полок и замкового соединения лопатки турбины / А.В Придорожный и др. // Вестник двигателестроения. – 2004. – №4. – С. 72–76.
4. О влиянии параметров бандажирования на надежность и ресурс рабочих лопаток турбин / В. М. Меркулов и др. Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 10.

УДК 629:735.4

Грачов Д. О.

провідний конструктор відділу міцності ДКБ АТ «Мотор Січ»,
м. Запоріжжя, Україна

Лисяков С. І.

начальник відділу міцності ДКБ АТ «Мотор Січ»,
м. Запоріжжя, Україна

ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ ВИРОБНИЧИХ ДЕФЕКТІВ НА ВТОМНУ МІЦНІСТЬ ОСНОВНИХ СИЛОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЛОПАТІ НЕСУЧОГО ГВИНТА ДЛЯ ВЕРТОЛЬОТІВ ТИПУ МИ-8

Лопаті несучого гвинта (ЛНГ) будь-якого вертольоту є критичним та високонавантаженим елементом його конструкції, адже при їх руйнуванні є дуже висока ймовірність виникнення катастрофічної ситуації. Через це вони мають досить обмежений ресурс [1] в порівнянні, наприклад, із ресурсом фюзеляжа.

Основними силовими елементами (ОСЕ) ЛНГ є лонжерон та наконечник [2]. Дослідження щодо впливу виробничих дефектів на втомну міцність ОСЕ металевої ЛНГ для вертольотів типу Ми-8 виконано на комлевому фрагменті, що випробовувався на трикомпонентному резонансному стенді (ТРС) в площині змаху (фрагмент).

Висновки за результатами дослідження

Першочерговим відбулося втомне руйнування [3] лонжерона фрагмента через наявний виробничий дефект при виконанні операцій нарізання фаски отвору та її шліфування. В результаті виникнення наскрізних втомних тріщин в лонжероні фактично був відсутній момент затягування периферійних болтів, що з'єднують наконечник із лонжероном, що призвело до виникнення мікропереміщень в болтовому з'єднанні і, як наслідок, фретинг-зносу на контактних поверхнях отвору наконечника із наступним виникненням в них втомних тріщин. Остаточне руйнування наконечника відбулося при повторному створенні сили розтягу приблизно в 20000 Н.

Наявність виробничого дефекту в одному з ОСЕ ЛНГ, вірогідно, призведе до поетапного втомного руйнування кожного ОСЕ із наступним руйнуванням всієї конструкції ЛНГ.

Конструкція і міцність



Рисунок 1 – Злам лонжерона

Список літератури

1. Безопасное усталостное разрушение элементов авиоконструкций. Синергетика в инженерных приложениях / А. А. Шанявский: изд. научно-технической литературы «Монография». – Уфа, 2003. – 803 с.
2. Прочность вертолетов / Р. А. Михеев: «Машиностроение». – Москва, 1984. – 280 с.
3. ГОСТ 23207-78. Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения.

УДК 621.452

Войтенко І. В.
провідний інженер-дослідник, група вібраційних досліджень
ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна

Торба Ю. І.
канд. техн. наук, начальник Експериментально-випробувального
комплексу ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна

ВИМОГИ ДО СИСТЕМИ ВІБРОДІАГНОСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ НЕСТІЙКИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГТД

Забезпечення надійної та своєчасної діагностики та контролю обертового зриву та автоколивань на робочих лопатках вентилятора та перших ступенях компресорів ГТД при спеціальних стендових випробуваннях, на стадії доведення двигуна, є актуальною темою.

Існують різні джерела сигналів для діагностики обертового зриву і автоколивань: динамічні деформації, акустичний шум, пульсації тисків в газоповітряному тракті і вібрації деталей і корпусів ГТД. Найпростіший, з погляду реалізації та економічності способом виявлення нестійких режимів роботи, є метод вібраційної діагностики з застосуванням спеціальних фільтрів на заздалегідь розрахованих діагностичних частотах. При цьому технічно простіше використовувати наявні датчики вібрації, що застосовуються при контролі перших роторних гармонік, ніж встановлювати додаткові датчики пульсації, виконуючи доопрацювання в конструкції двигуна, не згадуючи вже про комплекс робіт, необхідних для проведення тензометрування. До того ж, комплекс сигналів штатних та технологічних датчиків вібрації стендового контролю дозволяє визначити діагностичні частоти будь-якого елемента конструкції двигуна вентилятора, компресора або турбіни [1].

Для розв'язання цього завдання до вимірювальної апаратури висувається низка вимог. По-перше, багатоканальність, тому що окрім параметрів вібрації потрібні записи допоміжних параметрів (частот обертання роторів двигунів, міток часу та ін). По-друге, дистанційність, відстань від датчиків до вимірювальної системи може обчислюватися десятками метрів. По-третє, амплітудна характеристика каналу має бути лінійною в межах вимірюваних значень амплітуд. По-четверте, згідно з типовими спектрами вібрації двигуна, вимірювальний частотний діапазон апаратури повинен знаходитися в діапазоні 5 ... 10000 Гц.

Конструкція і міцність

Кожен вимірювальний канал містить кілька функціональних пристроїв, які включені послідовно (рисунок 1), які перетворюють вхідний сигнал (вібрацію) $x(t)$ у вихідний віброграму $y(t)$ [2].

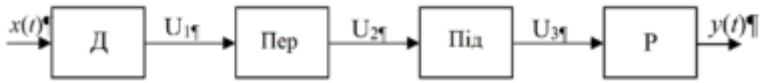


Рисунок 1 – Структурна схема вимірювального каналу

Датчик **Д** перетворює механічні коливання в електричні. Перетворювач електричних сигналів **Пер** здійснює різні лінійні перетворення (фільтрацію). Лінійний підсилювач **Під** забезпечує посилення сигналу до величини, необхідної для вимірювання і реєстрації (інтегрування, диференціювання). Реєстратор **Р** забезпечує індикацію та запис вібрації на накопичувач. Далі сигнал передається в автоматизовану інформаційно-вимірювальну систему, для подальшої сигналізації граничних рівнів та можливості автоматичного зупинки двигуна. Застосування апаратури, що має свій вихід на зупинку, може скоротити час виконання.

До точності вимірювання амплітуд так само пред'являється вимоги, оскільки крім якісної оцінки вібрації (її структура, характер, джерело), потрібна і кількісна, для контролю допустимих рівнів.

Для вирішення поставленої задачі найбільш доцільно використовувати п'єзоелектричні віброперетворювачі, які мають досить високий коефіцієнт перетворення, широкий частотний і динамічний діапазони вимірювань, відносно просту і надійну конструкцію, невеликі розміри та масу [2].

Після налаштування вібраційної апаратури на необхідні діагностичні частоти вести реєстрацію та контроль вібрацій може спеціаліст невисокої кваліфікації, що має початкові навички з запису та діагностики вібраційних сигналів.

Список літератури

1. Войтенко И. В. Идентификация и контроль неустойчивых режимов работы ГТД по сигналам датчиков вибрации в процессе испытаний / И. В. Войтенко / *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2019. – № 7. – С. 122–127.
2. Чигрин В. С. Віброакустика і вібродіагностика газотурбінних двигунів: навч. посіб. / В. С. Чигрин, С. І. Суховій. – Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», 2012. – 264 с.

УДК 338:658.5

Красников О. О.
начальник відділу компресорів ДП «Івченко-Прогрес»,
м. Запоріжжя, Україна

Кухтін Ю. П.
канд. техн. наук, провідний інженер, ДП «Івченко-Прогрес»,
м. Запоріжжя, Україна

ЗНИЖЕННЯ ВІБРОНАПРУЖЕНОСТІ ЛОПАТОК ОСЬОВОГО КОМПРЕСОРА ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

Одним із основних факторів забезпечення конкурентоспроможності двигуна є збільшення його ресурсу. Більшість дефектів авіаційних двигунів пов'язані з дією змінних навантажень на робочі лопатки компресора і турбіни, тому підвищення динамічної міцності лопаток одна із найважливіших умов забезпечення надійності двигуна.

Виходячи з наявного рівня розвитку чисельних методів і обчислювальних ресурсів, що розташовуються, рішення задачі зниження вібронапруженості (аеропружних коливань) лопаток компресора в зв'язаній постановці застосовувати в практиці проектних робіт не представляється можливим і вимагає розумних спрощень в підходах до рішень.

Як інструмент дослідження використовувався програмний пакет SUnFlow, в якому реалізовано чисельне інтегрування середніх по Рейнольдсу рівнянь Нав'є-Стокса (URANS), записаних у наближенні тонкого шару для циліндричної системи координат [3]. При розрахунку в'язких турбулентних течій основні рівняння збереження замикаються стандартною $k-\epsilon$ моделлю турбулентності Лаундера-Сполдінга.

У пакеті реалізовано чисельну схему С.К. Годунова, що має 2й порядок точності за простором. В'язкі компоненти апроксимуються центральними різницями.

Об'єктом для досліджень послужив ступінь компресора високого тиску, що містить 120 лопаток вхідного НА (ВНА), 83 робочі лопатки та 104 лопатки НА (рис. 1).

У розрахункову область увійшли повні кола вінців із сіткою, що містить 9,2 млн. осередків для першого вінця, 5,7 млн. осередків – для другого та 6.3 млн. осередків – для третього.

На вхідній межі розрахункову область задавалися: повний тиск, повна температура і кути входу потоку. На вихідний - статичний тиск та умова радіальної рівноваги. На поверхні ковзання між вінцями забезпечувалася умова консервативності для

Конструкція і міцність

конвективних та дифузійних потоків. Граничні умови на твердих стінках, знаходження зсувних напруг, кінетичної енергії турбулентності (ТКЕ) і швидкості дисипації ТКЕ, визначалися з допомогою пристеночної функції.

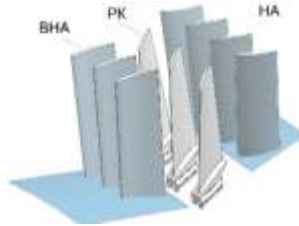


Рисунок 1 – Об'єкт дослідження

Виконано розрахунок двох варіантів ступенів компресора з різними конфігураціями ВНА:

1 варіант для 120 лопаток ВНА рівнорозташованих по колу;

2 варіант для 120 лопаток різнокроковим розташуванням лопаток по колу.

Порівняння результатів розрахунків наведено у таблиці 1

Таблиця 1 – Порівняння варіантів

Параметр	F_{η} [н]	$\sigma_{\max}$ (сторона тиску) [кгс/мм ²]	$\sigma_{\max}$ (сторона розрядження) [кгс/мм ²]
Варіант 1	1,46	0,388	-0,354
Варіант 2	0,45	0,013	-0,012
Δ	69%	97%	97%

Висновки

Для зниження резонансної напруги необхідно зменшувати амплітуду або змінювати частоту збудливої аеродинамічної сили.

Застосування різнокрокового ВНА дозволило знизити амплітуду сумарної збуджуючої сили на 69 %.

Отримане чисельним шляхом падіння напруги $\sigma_{\max}$ на перелопатки якісно збіглося з результатами фізичного експерименту.

Список літератури

1. Дрейер, Г. Учение о прочности [Текст] / Г. Дрейер. – М. : Машиностроение, 1964. – 416 с.

2. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин [Текст] : Справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич; – М. : Машиностроение, 1993. – 640 с.

3. Кухтин, Ю. П. Верификация метода численного моделирования отрывных течений газа [Текст] / Ю. П. Кухтин, В. М. Лапотко, Г. И. Слынько // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2013. – Вып. 8(105). – С. 35–39. – ISSN 1727-7337.

УДК 534:621

Пальчиковський В. О.
інженер-дослідник, ДП «Івченко-Прогрес», м. Запоріжжя, Україна

Морозов А. В.
провідний інженер-дослідник, ДП «Івченко-Прогрес», м.
Запоріжжя, Україна

Торба Ю. І.
канд. техн. наук, Заступник директора підприємства з наукової
роботи, ДП «Івченко-Прогрес», м. Запоріжжя, Україна

МЕТОДИ ДІАГНОСТУВАННЯ ПОШКОДЖЕНЬ КОМПОЗИТНОЇ ЛОПАТІ ПОВІТРЯНОГО ГВИНТА ПРИ ВТОМНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ

Проблема забезпечення відповідної нормативним документам стійкості до небезпечних вібраційних навантажень конструкцій, виготовлених з композиційних матеріалів (КМ), які експлуатуються за умов динамічних навантажень, є актуальною для сучасного авіаційного двигунобудування.

Для визначення обґрунтованої границі втоми деталей з КМ потрібно провести відповідні випробування для створення S/N кривої, результати яких здебільшого будуть залежати від своєчасного виявлення пошкоджень на стадії їх виникнення, спостереження за розвитком пошкоджень та визначенням моменту руйнування матеріалу.

Композитна лопать повітряного гвинта (ПГ) має складну внутрішню структуру та складається з декількох різних за властивостями матеріалів, тому для контролю виникнення та прогресування пошкоджень потрібно комбінувати методи діагностики [1].

Методи експериментального визначення характеристик розсіювання енергії в КМ мають низку специфічних особливостей, які залежать від багатьох факторів. Для аналізу впливу температури на дисипативні властивості композиту, використовують параметр, який визначено за приростом логарифмічного декременту коливань (ЛДК) до деформації. Він кількісно краще, порівняно з відносним зростанням ЛДК та падінням частоти коливань зразка, характеризує структурну цілісність зразка матеріалу навіть при відносно невеликому її порушенні внаслідок нагрівання і одночасному циклічному деформуванні. Метод реалізовано на зразках за умов чистого згину[2]. Проте для умов складного деформованого стану який виникає у лопаті під час резонансних коливань за різними формами дослідження не проведено. Тому

Конструкція і міцність

актуальною реалізацією методу є проведення досліджень на натурній лопаті ПГ з КМ.

Для вивчення ефекту саморозігріву лопаті та його впливу на характеристики втоми та міцності, проведено комплексне дослідження. Здійснено виміри температури критичної локальної області лопаті та дисипативних характеристик для складної згинально-крутильної форми коливальних. Відстежено зміну частоти та амплітуди резонансних коливальних при підвищенні температури з постійною потужністю, що підводиться до коливальної системи.

Список літератури

1. Пальчиковський В. О., Морозов А. В., Торба Ю. І. Методи діагностування дефектів деталей авіаційних двигунів з композиційних матеріалів. Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2021. – № 4 (173). – С. 102–109. DOI: 10.32620/aktt.2021.4sup1.14.
2. Деркач О. Л., Кобзар В. Л. Дослідження впливу підвищеної температури на дисипативні властивості односпрямованого вуглепластику. Технічні науки та технології. – 2022. – № 4(30). – С. 31–39. DOI: 10.25140/2411-5363-2022-4(30)-31-39.

УДК 534:621

Пальчиковський В. О.
інженер-дослідник, ДП «Івченко-Прогрес», м. Запоріжжя, Україна

Морозов А. В.
провідний інженер-дослідник, ДП «Івченко-Прогрес»,
м. Запоріжжя, Україна

Торба Ю. І.
канд. техн. наук, заступник директора підприємства з наукової
роботи, ДП «Івченко-Прогрес», м. Запоріжжя, Україна

РЕЗОНАНСНИЙ МЕТОД ВТОМНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВИРОБІВ З КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Однією із значних проблем, що виникають при розробці та експлуатації перспективних авіаційних газотурбінних двигунів є забезпечення динамічної міцності. Даний показник прямо впливає на надійність та ресурс двигуна оскільки більшість дефектів пов'язана з дією динамічних напружень від змінних навантажень, що різко зростають в умовах резонансу.

В дослідженні розглянуто лопать повітряного гвинта (ПГ) з композиційного матеріалу (КМ), що виготовлена методом комбінованого формування.

Лопать ПГ з КМ конструктивно складається з компонентів, які мають різні властивості матеріалів. Так, компонентами з ортотропними властивостями матеріалу є обшивка, лонжерон, ровінг. Складовими з ізотропними властивостями матеріалу є вкладиш, накладки [1]. Складна взаємодія між компонентами та фазами всередині кожного під час випробувань і складний напружено-деформований стан (НДС) не враховуються при дослідженні окремих зразків [2]. Тому для отримання точних експериментальних даних потрібно провести дослідження на натурному виробі з КМ.

Оптимальним для проведення дослідження є резонансний метод. Цей метод засновано на явищі зростання амплітуди вимушених коливань лопаті у разі наближення частоти збуджуючої сили, що надходить від вібраційного електродинамічного стенду, до частоти власних коливань лопаті. Метод дозволяє реалізувати різні форми коливань складного НДС виробу, які можуть виникнути при експлуатації.

Проведено втомні дослідження лопаті ПГ по двом формам коливань, які визначені при стендових випробуваннях. Особливостями дослідження є динамічна зміна частот власних форм коливань та перерозподіл НДС лопаті під час виникнення та розвитку пошкоджень.

Конструкція і міцність

Перспективами подальших досліджень є реалізація способу автоматичного утримання резонансу на визначених власних формах коливань та аналіз перерозподілу НДС лопаті.

Список літератури

1. Морозов А. В. Метод чисельного визначення динамічних характеристик лопаті повітряного гвинта з композиційного матеріалу. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2024. – № 2 (194). – С. 57–64. DOI: 10.32620/aktt.2024.2.06.
2. Shabani P., Shabani N. Fatigue life prediction of high-speed composite craft under slamming loads using progressive fatigue damage modeling technique. *Engineering Failure Analysis*. 2022. – Vol. 131. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105818.

УДК 629.735

Гвоздик Р. П.
аспірант, Національний університет «Запорізька політехніка»
інженер з діагностики та ремонту авіаційного двигуна, «АТ Мотор
Січ», м. Запоріжжя, Україна

Бабенко О. М.
канд. техн. наук, доцент, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

ЕЛЕКТРОПНЕВМАТИЧНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ КЛАПАНАМИ ПЕРЕПУСКУ ПОВІТРЯ

У 2024 році потреби енергосистеми України в газотурбінних приводах потужністю 6000-8000 кВт складає приблизно 60 одиниць, 30 з яких обладнані ГТП Д-336. Газотурбінні приводи Д-336 для управління роботою компресора використовують систему управління на базі автоматів керування компресора (АКК) 4017.6 для КВТ та АКК 4017.12 для КНТ [1].

Існуюча система управління клапанів перепуску повітря (КПП) КВТ і КНТ ГТП сімейства Д-336 складається з:

- 3-х клапанів перепуску повітря, розташованих за 3-м робочим колесом КНТ;
- 3-х клапанів перепуску повітря, розташованих за 4-м робочим колесом КВТ;
- агрегата керування клапанами КВТ – АКК 4017.6;
- агрегата керування клапанами КНТ – АКК 4017.12;
- 2-х малогабаритних сигналізаторів тиску теплостійких вібростійких МСТВ-2.1.

В силу конструкційних особливостей та умов експлуатації напрацювання на відмову АКК 4017.12 і 4017.6 складає приблизно 7000-15000 годин при міжремонтному ресурсі ГТП 25000 годин.

Вартість одного АКК складає приблизно 50000 доларів США. Враховуючи дефіцит нових агрегатів керування компресорами для забезпечення безперебійної роботи існуючих ГТП виникла гостра необхідність в пошуку альтернативних систем управління.

Наявні недоліки АКК 4017.12 і 4017.6:

- важкість реалізації 100% скидання потужності без згасання камери згоряння;
- низька ремонтоздатність в експлуатації;
- висока закупівельна вартість агрегатів.

Конструкція і міцність

Основною метою є розробка електропневматичної системи керування (ЕПСК) КПП КНТ і КВТ замість штатних агрегатів АКК 4017.12 і АКК4017.6 із використанням недорогих загальнодоступних електромагнітних соленоїдних клапанів для керування стабільною роботою компресора при різних скиданнях та накиданнях потужності та захисту ГТП від помпажу на перехідних режимах роботи ГТП та забезпечити 100% скидання потужності без згасання камери згоряння [2].

Принцип роботи ЕПСК наступний: на непрацюючому ГТП і в процесі запуску всі КПП відкриті. Закриття КПП здійснюється по електричній команді від системи автоматичного керування двигуном (САКД). При надходженні електричної команди на закриття КПП КВТ (КПП КНТ) на електромагнітні клапани (для КПП КНТ подається живлення, електромагніти спрацьовують й повітря з підвищеним тиском через останній щабель КВТ (для КПП КВТ) або через четвертий щабель КНТ (для КПП КНТ) надходить у керуючу порожнину відповідних КПП, що призводить до їхнього закриття. При знятті електричної команди від САКД з електромагнітних клапанів (для КПП КНТ) відбувається закриття КПП КВТ (КПП КНТ), при цьому нормально закриті клапани перекривають підведення тиску до керуючих порожнин КПП КВТ (КПП КНТ), а нормально відкриті клапани з'єднують порожнини з атмосферою, що призводить до їхнього відкриття.

Для підключення ЕПСК використовуються штатні місця відбору керуючого повітря аналогічно АКК 4017.6 та 4017.12. Повітря, що відбирається від ГТП (320–400 °С), пройшовши по теплообміннику, охолоджується до робочих температур ущільнень ЕПСК, через які подається повітря на КПП.

Таким чином, доступність і дешевизна використовуваних комплектуючих дає можливість значно знизити вартість системи керування КПП ГТП сімейства Д-336. Можливість керування КПП по сигналах від САКД забезпечує стабільний гістерезис спрацьовування КПП, що дозволяє ефективно й без шкоди для ГТП працювати в широкому діапазоні його режимів.

Список літератури

1. Boyce, Meherwan. “Gas Turbine Engineering Handbook 4th Edition”. Publisher: Butterworth-Heinemann; (November 23, 2011). No. of pages – 1000.
2. Михалевич М.Г. Оптимізація керуючих впливів на електропневматичний клапан виконавчого пристрою керування зчепленням. – Х. : Вісник ХНАДУ, вип. 93, 2021 – 128–135 с.

УДК 658.788

Котов О. Б.
д-р техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Семенов Є. В.
аспірант НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

КЛЮЧОВІ АСПЕКТИ МЕТОДИКИ СТВОРЕННЯ СУЧАСНИХ БЕЗПІЛОТНИХ АВІАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ ЛІТАКОВОГО ТИПУ ПЕРШОГО КЛАСУ

На сьогоднішній день, безпілотні авіаційні комплекси (БпАК) літакового типу стали невід'ємною складовою різних галузей економіки. Сучасні БпАК літакового типу мають можливість виконання багатьох завдань у різних галузях, напрямках та умовах, у тому числі шкідливих.

Враховуючи реалії активної протидії сучасно озброєному агресору за незалежність України, застосування БпАК літакового типу набуло нового широко-масштабного розвитку.

Поміж іншого, слід зазначити той факт, що динаміка активного багатобічного практичного експлуатування БпАК літакового типу в умовах комплексного застосування противником засобів вогневого ураження та радіо-електронної боротьби (РЕБ) спонукає фахівців конструкторських колективів плідне аналізувати результати фактичних протидії на землі та у повітрі.

Враховуючи результати цього аналізу об'єктивне з'ясовуються низки проблемних експлуатаційних питань та впроваджуються науково-технічні шляхи часткового вдосконалення тактико-технічних характеристик існуючих БпАК літакового типу та кардинальної модернізації перспективних зразків БпАК літакового типу, що проектується [1].

Невипадково для фахівців конструкторських колективів одним із найбільш ключовим інтелектуальне – трудомістким та науково - складним етапом створення БпАК літакового типу вважається творчий процес детального проектування замовленого авіаційного комплексу.

Основою процесу проектування авіаційного комплексу літакового типу являє детальна розробка ескізного і робочого проєктів у чіткої відповідності до отриманого тактико-технічного замовлення.

Алгоритм процесу розробки та створення серійного БпАК літакового типу першого класу включає в себе:

Конструкція і міцність

- визначення мети функціонального призначення БПАК літакового типу першого класу, що планується до створення;
- за метою функціонального призначення або отримання технічного завдання на створення перспективного БПАК;
- підбір інформаційних джерел про особливості практичної експлуатації БПАК або вже існуючі розробки моделей-аналогів перспективного БПАК цього типу;
- проведення бібліометричного аналізу змісту обраних публікацій щодо формулювання перспективної концепції створення БПАК необхідного типу та з'ясування спроможності їх ефективної практичної реалізації;
- розробка ескізного та робочого (технічного) проекту;
- створення або вдосконалення існуючої виробничої бази;
- виготовлення комплектуючих частин БПАК в цілому;
- підготовка до випробувань та проведення комплексу практичних випробувань експериментальних зразків нового БПАК;
- практичне створення навчально - матеріальної бази та організація безпосередньої фахової підготовки зовнішнього пілота (оператора) БПАК та членів зовнішнього екіпажу;
- отримання ліцензійного сертифікату на виробництво та експлуатацію нового зразка БПАК за вимогами ІКАО;
- комплексне розгортання промислової бази масового виробництва прийнятого до експлуатації нового зразка БПАК.

Процес проектування та створення БПАК літакового типу повинен відповідати наявним матеріалам і технологіям, напівфабрикатам та існуючим або спроектованим складовим елементам загальної конструкції цього типу літального апарату.

Таким чином, виготовлення БПАК у багатьох випадках починається ще до закінчення його проектування, що дозволяє коригувати розрахунки на міцність і істотно зменшувати їх обсяг, використовуючи результати випробувань елементів конструкції.

Технологія виготовлення елементів та вузлів конструкції БПАК розробляється одночасно з проектуванням і остаточно доводиться у процесі створення або проведення випробування експериментального зразка цього типу літального апарату.

Список літератури

1. Горбулін В.П. Збройна боротьба в контексті четвертої індустріальної революції // Вісник НАН України. – 2022, № 4. – С. 3–11.

**ОЦІНКА МІЦНІСТНОЇ НАДІЙНОСТІ ОСНОВНИХ
ДЕТАЛЕЙ ТРАНСМІСІЇ ВЕРТОЛЬОТА ТИПУ МІ-8 ПРИ
РОБОТІ З ФОРСОВАНИМИ ДВИГУНАМИ**

Сучасний стан найбільш застосовуваних вертольотів Мі-8 різних модифікацій пасажирського, транспортного та військового призначення характеризується тим, що в них є агрегати з обмеженим ресурсом, відмови яких безпосередньо впливають на безпеку польотів.

До таких агрегатів, поза іншими, відносяться такі найбільш навантажені агрегати трансмісії вертольота (АТВ) як головний, проміжний та хвостовий редуктори. Редуктору вертольота встановлюється час гарантованої роботи – ресурс – на основі великого обсягу конструкторських, технологічних і доводочних робіт по усуненню дефектів, а також великої кількості різномірних випробувань [1].

Для обґрунтованого збільшення ресурсу вертольотних редукторів необхідно мати наявні дані по навантаженості їх зубчастих передач на основних режимах польоту, результати стендових випробувань, розрахунків на міцність, витривалість, напруженодеформованого стану і т. і. Наявний обсяг таких даних дуже обмежений, тому виникає необхідність проведення досліджень і спеціальних випробувань для визначення ресурсоздатності АТВ.

В аерокосмічному і військовому застосуванні, де вага відіграє одну з головних ролей, системи зубчастих передач проєктуються за умов, що суттєво позначаються на їх довговічності. Крім того, зубчасті передачі іноді проєктують, застосовуючи статичний аналіз. Проте, коли вони працюють на великих частотах обертання, треба враховувати коливальні процеси, що невідворотно супроводжують їх експлуатацію.

Отримані результати будуть використані в перевірочних розрахунках, випробуваннях відповідних деталей редукторів за різними критеріями і підготовці висновків про доцільність продовження ресурсів трансмісій вертольотів Мі-8 та їх модифікацій.

Для авіаційних зубчастих передач характерний розподіл навантаження між спряженими парами зубців. Найбільш небезпечним для роботи зубчастого вінця є крайковий контакт на вході в зачеплення і виході з нього. Досвід свідчить, що в цих точках мають місце максимальні контактні напруження.

Редуктори авіаційної техніки, зокрема вертольотів, зазнають у польоті багаточастотне вібраційне навантаження в результаті

Конструкція і міцність

багаточисельних взаємодій зубчастих коліс різних ступенів з різними швидкостями їх обертання. Існуючі вібрації можуть породжувати коливання дисків коліс, що призводить до виникнення багатоциклової втоми і швидкого вичерпання дисками їх довговічності.

Збудження резонансних згинальних вібрацій коліс викликається динамічними навантаженнями в зубчастому зацепленні, джерелом яких є крутильні коливання зубчастих приводів під час обертання коліс. Особливо небезпечні підвищені динамічні навантаження в зацепленні, зумовлені резонансними крутильними і параметричними коливаннями зубчастих приводів.

Під час роботи зубчастих передач у складі редукторів вертольотів Мі-8, їх модифікацій та ін. виникають втомні руйнування зубчастих коліс на ободі. Такі руйнування зумовлені згинальними резонансними коливаннями коліс у робочому діапазоні частоти обертання.

Контактні руйнування зубців є основною причиною відмов швидкохідних зубчастих коліс в добре змащуваних закритих передачах. Під час ремонту авіаційних двигунів із загальної кількості відбракованих зубчастих коліс до 85 % складають колеса, відбраковані з причини контактних руйнувань зубців: вищерблювання і відшарування [2].



Рисунок 1 – Вищерблювання зубчастих коліс

Список літератури

1. Авіаційні зубчасті передачі та редуктори, під ред. Э. Б. Вулгакова. – М. : Машинобудування, 1982. – 375 с.
2. Кобелева К. В. Огляд методів підвищення довговічності авіаційних зубчастих передач: вісник ПНПУ / К. В. Кобелева, В. Р. Туктамышев / Аерокосмічна техніка. – Перм, 2017. – № 50. – С. 128–138.

УДК 629.7.067

Пухловський С. В.
аспірант, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Качан О. Я.
д-р техн. наук, проф., НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ МУЛЬТИЦИКЛОННОГО ПИЛОЗАХИСНОГО ПРИСТРОЮ

Вертольоти - це літальні апарати, в яких підйомна сила і тяга забезпечуються несучими гвинтами, що горизонтально обертаються. Завдяки цьому вони можуть зависати в повітрі, злітати і сідати вертикально навіть на непередбачених майданчиках поза межами аеродромів. Такі умови експлуатації супроводжуються підвищеною запиленістю повітря, спричиненою потоками, що направляються лопатями гвинта до землі.

Частинки пилу, потрапляючи в двигун вертольота, спричиняють абразивне зношування лопаток компресора, що скорочує ресурс двигуна і з часом може призвести до аварійних відмов.

Захист газотурбінного двигуна вертольота від пилу включає різні методи, що запобігають або знижують вплив абразивних частинок на його роботу. Пилозахисні пристрої (ПЗП) є основними засобами захисту двигунів від пилу, піску та дрібних сторонніх предметів. Однак вони мають певні недоліки, зокрема зниження потужності силової установки через додатковий аеродинамічний опір, а також ускладнення технічного обслуговування двигуна на землі.

У світовій авіації використовуються такі типи пилозахисних пристроїв (ПЗП): інтегровані, бар'єрні та мультициклонні, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Інтегровані (або інерційні) ПЗП компактні, підходять для вертольотів різних розмірів, проте забезпечують найнижчий рівень очищення повітря серед усіх інших типів. Бар'єрні ПЗП мають найвищу ефективність очищення, але мають великі габарити, вимагають ретельного обслуговування і встановлюються переважно на невеликі вертольоти. Оптимальним варіантом для середніх вертольотів є мультициклонні ПЗП, які мають вищу ефективність очищення повітря, в порівнянні з

Конструкція і міцність

інерційними ПЗП, та менші габаритні розміри в порівнянні з бар'єрними ПЗП.

Мультициклонні ПЗП складаються з панелей із трубок-циклонів, які надають повітрю вихровий рух при проходженні через них, та очищують його за рахунок відцентрових сил.

Ефективність очищення та аеродинамічний опір циклону залежать від багатьох факторів, серед яких основними є геометричні розміри, форма його елементів та їхні пропорції.

Об'єктами дослідження є прямооточні вихрові трубки-циклони, що складаються з двох основних частин: самої трубки, оснащеної завихрювачем для надання повітрю вихрового руху, та дифузора, через який відводиться очищене повітря. У ході досліджень було відібрано кілька прототипів вихрових трубок, що відрізняються геометричними параметрами, кількістю лопаток завихрювача, кроком витка спіральної частини та формою серцевини завихрювача. Дифузори для всіх прототипів були стандартизовані та мали однакові характеристики, що дозволяло порівнювати ефективність роботи кожної трубки-циклона в однакових умовах.

Випробувальний стенд створює імітацію роботи вихрових трубок у ПЗП за рахунок розрідження, створюваного компресором. Обладнання дозволяє здійснити підготовку та подачу контрольного запиленого повітря до випробувальної вихрової трубки, вимірювати падіння тиску повітря при проходженні його через вихрову трубку, для оцінки аеродинамічного опору, а також збір відфільтрованого та залишкового пилу для визначення ефективності очищення.

Такі випробування дають змогу отримати характеристики роботи різних конфігурацій циклонів у наближених до реальних умовах, що сприяє визначенню оптимальних геометричних параметрів для вихрових трубок. Отримані експериментальні дані можуть бути використані для налаштування та вдосконалення комп'ютерних математичних моделей. Завдяки цим моделям, застосовуючи методи обчислювальної гідродинаміки, можна досліджувати й інші варіанти конструкцій циклонів без необхідності проведення кожного експерименту в реальних умовах. Такий підхід не лише скорочує витрати на тестування прототипів, але й прискорює процес розробки нових конструкцій пилозахисних пристроїв, дозволяючи швидше оцінити їхню ефективність та адаптувати до умов експлуатації.

Красуляк І. М.
аспірант, Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, Україна

Стрілецький Ю. Й.
д-р техн. наук, професор, Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, Україна

ОПОСЕРЕДКОВАНИЙ КОНТРОЛЬ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЧЕРЕЗ АНАЛІЗ ТЕМПЕРАТУРНИХ ГРАДІЄНТІВ

Використання множини датчиків для виявлення опосередкованих залежностей є перспективним напрямком сучасних наукових досліджень, який дозволяє суттєво підвищити інформативність вимірювальних результатів. Мультисенсорні системи створюють унікальні можливості для комплексного аналізу складних фізичних процесів шляхом встановлення прихованих взаємозв'язків між різними параметрами навколишнього середовища. Такий підхід змінює методологію моніторингу, надаючи дослідникам інструмент для виявлення некоректних чи частково втрачених даних за сукупністю інших вимірів параметрів повітряного середовища.

Суть розробленої системи залежностей полягає у комплексному аналізі температурних градієнтів та їх взаємозв'язку з фізичними властивостями повітря. Дослідження базується на чотирьох ключових параметрах: горизонтальному градієнті температури, вертикальному градієнті температури, динаміці зміни температури та різниці температур між масивними теплоємними тілами та повітрям. Досліджувалися вплив вологості, концентрації вуглекислого газу, пилу на вибрані температурні параметри.

Виявлення збільшення вологості здійснюється за аналізом трьох факторів: покращення теплопередачі, збільшення теплоємності та зменшення інтенсивності вертикальних конвективних потоків. Критеріями слугують: зменшення горизонтального градієнта, зменшення вертикального градієнта та уповільнення динаміки температурних змін.

Аналіз концентрації вуглекислого газу передбачає врахування його впливу на теплопровідність, термостабілізацію та просторовий розподіл. Основні фактори включають зниження теплопровідності, формування "теплової подушки" в нижніх шарах та диференційовану динаміку температурних змін. Критеріями

Конструкція і міцність

виступають: збільшення горизонтального градієнта температури, посилення вертикального градієнта температури та специфічна динаміка температурних змін у різних шарах повітряного середовища.

Дослідження концентрації пилу базується впливі концентрації пилу на теплопередачу, добові температурні коливання та тепловий обмін. Система враховує здатність пилу покращувати теплопередачу, посилювати температурні флуктуації та змінювати теплообмін між поверхнями. Індикаторами слугують: зменшення горизонтального та вертикального температурних градієнтів, а також посилення динаміки температурних змін.

Використання множини сенсорів дозволяє створити принципово новий підхід до збору даних про систему і зокрема про параметри повітря у приміщенні. Завдяки інтелектуальному аналізу температурних градієнтів з'являється можливість опосередковано виявляти зміни концентрацій вологості, вуглекислого газу та пилу. Цей метод суттєво розширює можливості традиційних вимірювальних систем, надаючи більш глибоку та всебічну інформацію про стан повітряного середовища. Запропонована методологія демонструє принципову можливість збільшення інформації про той чи інший параметр за сукупністю опосередкованих параметрів, збільшуючи достовірність отриманих результатів вимірювань.

УДК 629.7.02.

Філіпковський С. В.

д-р техн. наук, професор каф.103, Національний аерокосмічний
університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», м. Харків, Україна

Джуринський О. М.

аспірант каф.103, Національний аерокосмічний університет
ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», м. Харків, Україна

АДДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ У СУЧАСНОМУ АВІАБУДУВАННІ

В результаті аналізу сучасних тенденцій стає очевидним, що адитивні технології та 3D-принтинг активно впроваджуються в сучасне авіабудування [1, 2]. Особливо значущим є їх використання для повітряних суден, що знаходяться в експлуатації при проведенні ремонту і технічного обслуговування.

Визначено найбільш розповсюджені деталі, що використовуються в сучасних авіаційних конструкціях, та які володіють найбільшим потенціалом для покращення за допомогою адитивного виробництва та генеративного дизайну [2]:

- ребра жорсткості та шпангоути (найчастіше використовуються в КСС крил та фюзеляжів для забезпечення міцності та стійкості);
- кріпильні елементи й вузли (кронштейни, качалки, кріпильні пластини);
- елементи паливної системи (паливні баки, насоси та трубопроводи). Використання 3D-принтингу дозволяє створювати паливні баки з інтегрованими каналами і складними формами;
- компоненти двигунів (лопатки турбін, форсунки). Адитивний підхід дозволяє створювати компоненти з внутрішніми охолоджуючими каналами й оптимізованими структурами).

Оптимізація параметрів друку – складна багатогранна задача, в якій потребується враховувати велику кількість факторів, таких як матеріали, форма та умови експлуатації. У теперішній час алгоритми штучного інтелекту допомагають автоматизувати аналіз параметрів 3D-друку, підбираючи найбільш ефективні налаштування для отримання бажаних характеристик деталі [2].

Серед них виділено найбільш перспективні напрями:

Технологія виробництва і ремонту

- алгоритми топологічної оптимізації;
- алгоритми згорткових нейронних мереж для аналізу зображень та розпізнаванню параметрів друку;
- алгоритми генетичної оптимізації для вибору найбільш «життєздатної» за всіма обраними параметрами деталі;
- алгоритми лінійної регресії для прогнозування витрат та часу на базі вже відомих ототожнюючих параметрів.

В рамках дослідження розглянуто й запропоновано оптимальні алгоритми формування металевих деталей аеродинамічних поверхонь для ЛА з використанням 3D-друку, серед яких:

- алгоритми аеродинамічної оптимізації форм за допомогою методів обчислювальної аерогідродиніміки (CFD) [3];
- структурна оптимізація форм і моделей за допомогою методів скінченоелементного аналізу (FEM);
- методи топологічної оптимізації форми на базі самонавчальних нейронних мереж по заданим параметрам.

Таким чином, інтеграція алгоритмів топологічної оптимізації, генеративного дизайну, моделювання методом скінчених елементів та аналізу за допомогою глибоких нейронних мереж дозволить досягти значного поліпшення характеристик деталей, що підлягають оптимізації.

Список літератури

1. World Intellectual Property Report Breakthrough Innovation and Economic Growth [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo_pub_944_2015.pdf
– Назва з екрана (дата звернення: 23.10.2024).
2. Аддитивные технологии в производстве изделий аэрокосмической техники: учебное пособие для вузов / А. Л. Галиновский [и др.] – М. : Издательство Юрайт, 2020. – 115 с.
3. method for reducing parasite drag of medium transport helicopter [Electronic resource] / M. Kybalnyy, O. Prytula, S. Degtiarenko, K. Izviekova // Aerospace Technic and Technology. – 2023. – Vol. 0, No. 2. – P. 46–55. – Mode of access: <https://doi.org/10.32620/aktt.2023.2.05> (date of access: 23.10.2024). – Title from screen.

УДК 621.452.3:539.3

Уланов С. О.
д-р філософії, доцент
НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна

Качан О. Я.
д-р техн. наук, професор
НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ НА НЕСУЧУ ЗДАТНІСТЬ ТОНКОСТІННИХ ВАЛІВ ГТД

Значний внесок у забезпечення якості виготовлення несучих поверхонь деталей ГТД вносять прогресивні технологічні методи їх обробки.

Істотний вплив на формування параметрів якості несучих поверхонь деталей ГТД здійснює технологічна спадковість попередніх операцій технологічного процесу їх виготовлення, починаючи від заготівлі і до отримання деталі [1, 2].

Застосовно до сучасних порожнистих валів КВТ двоконтурних газотурбінних двигунів, товщина стінок яких становить 1,5...2 мм за внутрішнього діаметру до 300 мм і більше. Розробка раціональної технології їх виготовлення, що забезпечує їхню високу опорну здатність, є актуальною та має важливе практичне значення, бо дає змогу підвищити надійність ГТД загалом.

Виготовлення пустотілого тонкостінного вала КВТ (рис. 1) авіаційного двигуна Д-36 містить такі технологічні операції.

1. Обрізка штампування.
2. Термообробка $T = 1080\text{ }^{\circ}\text{C}$ - 2 години.
3. Розкатка.
4. Термообробка $T = 1080\text{ }^{\circ}\text{C}$ - 8 год + $T = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ - 16 год.
5. Чорнове точіння.
6. Травлення.
7. Чистове точіння (Т).
8. Шліфування (Ш).

Електрохімічне полірування (ЕХП).

Вали КВТ виготовляють зі сплаву ЭИ 437БУ-ВД, хімічний склад якого відповідає нормам ТУ.

Мікроструктура матеріалу валів являє собою Ni-Cr твердий розчин, зміцнений карбідною та інтерметалідною фазами.

Карбіди по межах зерен дискретні (рис. 2).

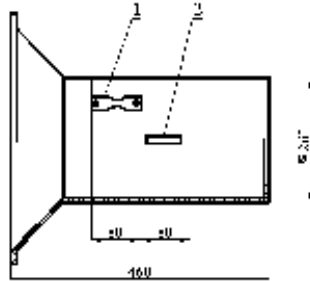


Рисунок 1 – Схема вирізання зразків:

1 – зразок для випробувань на втому;

2 – зразок для дослідження залишкових напружень

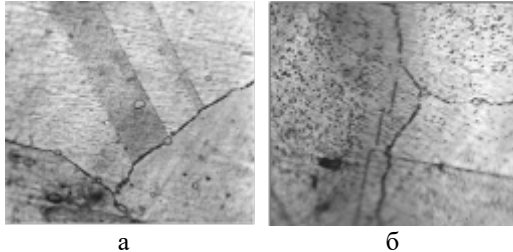


Рисунок 2 – Мікроструктура сплаву ЭИ 437БУ-ВД вала КВТ авіаційного двигуна Д-36:

а – для вала № 1; б – для вала № 2

Так, під час випробування зразків, які вирізані із вала № 1, за режимом $\sigma = 750$ МПа, $T = 550$ °С, час до руйнування перебував у межах 101...194 годин (при нормі ≥ 300 годин).

Під час випробування зразків, які вирізані із вала № 2, за режимом $\sigma = 750$ МПа, $T = 550$ °С, час до руйнування – 168...287 годин (при нормі ≥ 300 годин).

Список літератури

1. Ящерицын П. И. Технологическая наследственность в машиностроении / Ящерицын П. И., Рыжов Э. В., Аверченков В. И. – Минск : Наука и техника. – 1977. – 256 с.
2. Качан А. Я. Математическое моделирование влияния технологической наследственности финишных методов обработки на предел выносливости деталей ГТД / Качан А. Я., Уланов С. А. // Вестник двигателестроения. – 2015. – № 1. – С. 81–86.

УДК 621.914.22

Левченко А. В.

аспірант кафедри «Технологія машинобудування»
НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна

Тришин П. Р.

канд. техн. наук, доцент, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Козлова О. Б.

канд. техн. наук, доцент, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ СИЛ ПРИ РЕГЕНЕРАТИВНІЙ ВІБРАЦІЇ

Процес різання супроводжується виникненням сил, зумовлених взаємодією різальної кромки інструменту з оброблюваним матеріалом деталі. Ці сили впливають на точність обробки, стан поверхні, а також швидкість зношування інструменту. Для розуміння природи динамічних сил та їх впливу на різальний процес важливо не лише досліджувати їхнє походження, а й розробити методи експериментального виміру цих сил. В умовах різання найважливішу роль відіграють регенеративні автоколивання (АК), що виникають через хвилястість вільної поверхні різання, що утворилася після попереднього проходу інструменту.

Під час різання різальна кромка інструменту одночасно контактує з матеріалом по передній та задній поверхнях. На передній поверхні виникає основна сила стружкоутворення, яка формується за рахунок взаємодії різальної кромки зі стружкою. На задній поверхні виникає сила від тертя різця по поверхні різання. Кожна з цих сил впливає незалежно одна від одної, однак вони обидві викликають коливальні рухи різця, впливаючи на регенеративні АК. Вивчення сил, що діють на різець в умовах регенеративних автоколивань є фундаментальним завданням для вдосконалення технології різання металів.

В результаті дослідження, використовуючи модель Мерчанта М. [1] була розроблена теоретична система сил, що діють на різець-осцилятор з одним ступенем свободи в напрямку зміни товщини зрізу (вісі x).

Сили, що діють на різець-осцилятор, можна розділити на дві групи:

Технологія виробництва і ремонту

1. Сили різання – пов'язані з процесом стружкоутворення. Ці сили визначаються умовами рівноваги стружки, яка формується між поверхнею зсуву та контактною поверхнею стружки.

2. Сили переміщення – залежать від маси інструменту та деталі і пов'язані з рівновагою між силами різання та пружними, інерційними та демпфуючими силами різця-осцилятора.

Ці групи сил взаємопов'язані, і за їх взаємодії виникає складна система навантажень, яка передає змішані коливальні рухи на різальну кромку.

Для експериментального дослідження системи сил під час регенеративної вібрації була розроблена конструкція різця-осцилятора з одним ступенем свободи [2], яка забезпечує рух тільки по вісі x , виключаючи вплив координатного зв'язку на виникнення регенеративних АК. Використання датчиків переміщень дало можливість записувати відхилення різальної кромки в процесі різання у вигляді осцилограм.

Проведені дослідження показали, що зсув різальної кромки різця-осцилятора в умовах регенеративних АК відображають динаміку процесу різання. Осцилограми демонструють закономірне відхилення різальної кромки, що дозволяє об'єктивно оцінювати вплив всіх видів сил на динамічні параметри різання. Систематичне дослідження цих сил та їх характеристик дозволяє не лише покращити теоретичні моделі процесу різання, а й застосовувати їх на практиці для оптимізації виробничих процесів.

Результати досліджень дозволяють глибше зрозуміти механізм виникнення динамічних сил та розробити методи управління ними для підвищення якості обробки та довговічності інструментів. Дослідження в цій галузі відкривають можливості для вдосконалення методів контролю процесу різання, забезпечуючи стабільніші та точніші результати в металообробці.

Список літератури

1. Merchant M. E. Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip. / M. E. Merchant // Journal of Applied Physics. – 1945. – Issue 16. – P. 267–275.

2. Пат. UA 157016 МПК (2024.01) B23B 27/00 Різець-осцилятор для дослідження процесу різання / Внуков Ю.М., Тришин П.Р., Дядя С.І., Козлова О.Б. – и 202401426 ; заявл. 18.03.2024; опубл. 29.08.2024, Бюл. № 35.

УДК 62-213.9

Яковлев О. В.
аспірант, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Бабенко О. М.
канд. техн. наук, доцент, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ПІДВИЩЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ КОМПОЗИТНИХ КАБІН ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

Згідно з вимогами авіаційних правил АП-29 одним із найважливіших критеріїв забезпечення безпеки польотів є здатність повітряного судна працювати в умовах блискавок. Блискавка може спричинити критичні пошкодження фюзеляжу, а також несправності електрообладнання, радіонавігації та силових установок. Тому важливою складовою при проектуванні є такий критерій, як захист від блискавки. Найважливіший вплив на блискавкозахист має електропровідність кабіни судна. Для виконання цих умов в конструкцію вводять електропровідний шар. Конструктивно цього досягають використанням провідних матеріалів (вуглецеві нанотрубки або металеві частинки), застосуванням шарів з провідними властивостями (сітки, листів фольги) та посиленням провідних елементів (провідні вставки, армування кабіни). Технологічно цього досягають осадженням та напilenням металів на композит, застосуванням струмопровідних паст, зв'язок та покриттів.

Об'єктом дослідження послугувала розробка композитної кабіни для гелікоптера малої злітної ваги (3т) МСБ-2. Основною проблемою під час проектування та виготовлення кабіни було забезпечення належної блискавкозахисності відповідно до АП-29, тобто здатності витримувати високі напруги грозового розряду, при цьому не руйнуючись та захищаючи обладнання. Робилися спроби посилити електропровідність кабіни шляхом введення металевого силового каркасу з мідних та алюмінієвих шин та пластин усередині кабіни у місцях розташування основної електроніки. Це частково вирішило завдання забезпечення обладнання енергією, проте завдання блискавкозахисності та екранування не вирішило. Пропонується розгляд та випробування різних технологій

Технологія виробництва і ремонту

виготовлення композитних кабін на основі випробувань натурних зразків, виготовлених з різними конструкторсько-технологічними підходами. Планується представити кілька технологій зразків композитів, а саме: з поліефірною сполучною та наповнювачем у вигляді вуглецевих нанотрубок; з полімерною сполучною та внутрішніми шарами з алюмінієвої або мідної фольги; з полімерною сполучною та внутрішніми шарами з дрітчастої сітки з міді або алюмінію; полімерної сполучної з покриттям, що напильється; композитів із стільникових провідних пластин залитих полімерною сполучною. Випробування зразків шириною 100 мм та довжиною 500 мм будуть проводитися для кожного типу зразка окремо.

Випробування пропусканням високовольтного розряду напругою 30–50 кВ протягом 5–10 с імітуватиме потрапляння літального апарату до грозового розряду. Критерієм оцінки випробування зразків буде ступінь руйнування матеріалу (обвуглювання, оплавлення), а також можливість подальшого пропускання електричного струму з необхідним питомим опором (електропровідністю).

Випробування навантаженням зразка напругою бортової мережі 27В постійного струму та 115В змінного струму імітуватиме штатну роботу. Сила струму при 27В становитиме 300А, при 115В – 100А. Час випробування складає 30 хвилин. Критерії оцінок – аналогічні високовольтному розряду. Ці навантаження будуть проводити для зразків як до високовольтних випробувань так і після них. Установкою формування високої напруги буде генератор грозових імпульсів типу Маркса (Lightning Technologies 120 x XNUMX), джерелом 115В – однофазний перетворювач напруги, джерелом живлення 27В – автономне аеродромне джерело живлення типу АПІ-800-Т. Вимірювання електричного опору зразків до та після випробувань буде проводитися комплексом Megger TPT 320. Результати, отримані після випробувань надалі визначають переваги та недоліки конструкторсько-технологічних способів покращення якості композитних кабін загалом та сформує оптимальний підхід до їх виготовлення.

УДК 621.452.3

Куц Д. О.

Провідний конструктор, АТ «Мотор Січ», м. Запоріжжя,
Україна

Басов Ю. Ф.

Канд. техн. наук, Головний конструктор, АТ «Мотор Січ»,
м. Запоріжжя, Україна

ПІДВИЩЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ВИТРАТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАВИХРЮВАЧА КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Адитивні технології, такі як 3D-друк, надають нові можливості для оптимізації конструкції завихрювачів. Вони дозволяють створювати складні геометричні форми, які неможливо або вкрай складно отримати традиційними методами. Це відкриває шлях до отримання розрахункових аеродинамічних і геометричних характеристик.

Метою роботи є покращення стабільності витратних характеристик та шорсткості поверхонь по контурах завихрювача шляхом розробки консолідованої конструкції завихрювача та перетворення його у монодеталь, а також оптимізація адитивних технологічних процесів мікрометалургійного пошарового сплавлення жаростійких сплавів.

Зокрема, застосування методу SLS для виготовлення завихрювача камери згоряння демонструє, як можна ефективно оптимізувати її геометричні параметри, досягаючи необхідних витратних характеристик виробу без додаткової підготовки виробництва. скоротити час відпрацювання конструкції та об'єм постобробки.

Традиційний завихрювач складається з трьох деталей, виготовлених литтям за виплавлюваними моделями має ряд недоліків, а саме: значна кількість браку як виливок, так і готових деталей через не відповідність витрат повітря як по контурах так і сумісно, нестабільна геометрія внутрішніх порожнин та шорсткості поверхонь, а також підбір завихрювачів по витратним характеристикам.

Вирішення вищевказаних проблем лежить у підвищенні точності та шорсткості поверхні внутрішніх порожнин, чого можна досягти з переходом на адитивні технології.

Технологія виробництва і ремонту

Технологія SLS найбільш широко використовується в аерокосмічній галузі завдяки її здатності виробляти повністю щільні деталі з високою роздільною здатністю та складною геометрією. Вибір МПК для 3D-друку монодеталі завихрювач обумовлений аналізом вже досягнутих рішень в аерокосмічній галузі аналогічних деталей або деталей, що працюють в умовах підвищених температур і тисків. Такими прикладами виготовлення деталей та вузлів виготовленими по технології SLS з матеріалу IN 718 можуть бути: сопло паливної форсунки для двигуна Arpano і завихрювача камери згоряння двигуна Ardiden-3 та ін.

Завдяки зміні конструкції, що об'єднала окремі частини в єдине ціле та застосування 3D-друку монодеталі завихрювач методом SLS, виключились не лише зварні та паяні шви ливарних завихрювачів, де кількість забракованих деталей може досягати до 30%, але й значно зменшилась номенклатура деталей з 3 до 1, трудомісткість скоротилася майже вдвічі за рахунок зменшення постобробних операцій та практично відсутні браковані деталі.

Результати перевірки геометрії методом 3D-сканування внутрішніх порожнин розрізаних литих завихрювачів та завхрювачів, які отримані методом SLS показали, що литі завихрювачі мають незначні, але відхилення від поля допуску, проти завихрювачів отриманих методом SLS, які відхиленя не мають.

Результати перевірки шорсткості профілометром внутрішніх порожнин розрізаних литих завихрювачів та завхрювачів, які отримані методом SLS показали, що литі завихрювачі мають значно більшу шорсткість, проти завихрювачів отриманих методом SLS.

На підставі аналізу результатів дослідження витратних характеристик по контурах завихрювачів отриманих шляхом продування на випробувальній установці показано, що в завихрювачах геометричні відхилення внутрішніх поверхонь контурів, що виготовляються за традиційною ливарною технологією, призвів до істотного розкиду витратних характеристик. Це призводить до ретельного підбору при комплектуванні. Монодеталі мають більш стабільні геометричні характеристики, що як наслідок стабілізує різницю загальних наведених витрат повітря спільно по контурах до $\pm 1,5\%$, що цілком відповідає вимогам комплектування.

Таким чином, застосування адитивних технологій сприяє покращенню геометрії та шорсткості поверхонь деталей, що забезпечує стабільні витратні характеристики завихрювача і як наслідок виключає необхідність підбору за цим параметром.

УДК 629.7:656.7

Чагаров М. М.
Інженер-конструктор II категорії, АТ «Мотор Січ»,
м. Запоріжжя, Україна

МЕХАНІЧНО-ЗАМКНУТИЙ СТЕНД ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ РЕДУКТОРІВ

Редуктор дозволяє підтримувати оптимальну швидкість гвинта, щоб лопаті працювали з максимальною ефективністю і не втрачали тягу через трансзвукові ефекти.

Стенові випробування редуктора для авіаційних двигунів дозволяють перевірити його надійність, ефективність та працездатність в умовах наближених до реальних.

Побудова стенду вимагає затрат, але існують концепції, що дозволяють здешевити випробування. Це концепції енергозберігаючого стендів та концепції розімкнутого та замкнутого стендів.

Установки розімкнутого типу джерело потужності обертає редуктор і передає через нього повну потужність на гальмівний пристрій.

В установках замкнутого типу створюються окружні зусилля у зубчастих передачах за допомогою завантажувального пристрою. Він створює попередньої закрутки валів відносно один одного, тим самим створюючи механічної рециркуляцію енергії.

Характерними компонентами такого стенду, є наявність технологічного редуктора (подібного до випробуваного) що замикає силовий контур.

Концепція енергозберігаючого стенду передбачає наявність коштовних рекуперативних систем, що повертають енергію на приводний двигун, до складу яких входить генератор замість гальмівного пристрою.

Для вибраного концепту стенду було запроектовано комплекс обладнання: трансмісія, автоматизована система керування та додаткові системи.

Будуть відбуватися приймальні, приймально-здавальні, доводочні, періодичні і ресурсні випробування редуктора.

До трансмісії входять: привідний пристрій (електродвигун та мультиплікатор), задній та передній редуктори для підвищення обертів та замикання трансмісії, редуктор технологічний.

Технологія виробництва і ремонту

Також входить навантажувальний редуктор із косозубими циліндричними зубчастими колесами й гідромеханічним завантажувальним пристроєм.

Розрахункова величина закручування валів в 1 градус.

Також входить пристрій для завантаження осьовим зусиллям вивідного валу випробовуваного редуктора (два гідроциліндри).

Автоматизована система управління керує усіма системами та механізмами.

Контролює параметри: тиски, моменти, зусилля, оберти, температури.

Забезпечує проведення випробувань на різних режимах роботи: злітний, максимальний тривалий, крейсерський, реверс, польотний малий газ, та земний малий газ.

Забезпечує реєстрацію та архівування даних, формує поточні та підсумкові протоколів відповідно до виду випробування.

Мається пристрої для завантаження привода генератора редуктора та привода регулятора гвинта.

Таким чином, вибрана концепція механічно-замкнутого стенду для випробування редуктора дозволяє економити енергію.

Стенд дозволяє ефективно виявляти недоліки виготовлення редуктора при чому переваги концепції переважають недоліки.

Список літератури

1. Viscotherm Rotodiff Gearbox Tester Lowers Energy Costs for Back-to-Back Gearbox Test Rigs [Electronic resource] // Power Transmission Engineering Magazine. – Mode of access: <https://www.powertransmission.com/articles/5942>

2. В.А. Григорьев. Испытания авиационных двигателей: Учебник для вузов, В.А Григорьев, А.С. Гишваров – М. : Машиностроение, 2009. – 502 с.

3. Mozafari, S. DESIGN OF A MECHANICALLY CLOSED-LOOP TEST RIG FOR TESTING AVIATION INDUSTRY'S GEARBOXES [Electronic resource] / Mozafari, S., Rezazadeh, M., Dolatkha Takloo, S., & Mardani, M // Aviation. – 2017. – Vol. 21, No. 4. – P. 132–142. – Mode of access: <https://doi.org/10.3846/16487788.2017.1415225>

УДК 621.914.22

Гембель І. Ю.

аспірант кафедри «Технологія машинобудування»
НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна

Чумак І. М.

магістрант кафедри «Технологія машинобудування»
НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна

Тришин П. Р.

канд. техн. наук, доцент, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Козлова О. Б.

канд. техн. наук, доцент, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

ФІЗИЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ВИНИКНЕННЯ ВІБРАЦІЙ ПРИ ТОКАРНІЙ ОБРОБЦІ

Вібрації при обробці різанням охоплюють широкий спектр видів різання та суттєво впливають на якість та точності деталей, знижують довговічності верстатів та інструментів та погіршують умови праці. На сьогоднішній день накопичено значний практичний досвід у вирішенні проблем вібрацій на виробництві. Це - використання різноманітних технологічних прийомів для пригнічення вібрацій та впровадження новітніх аналітичних методів прогнозування умов їх виникнення.

Проте деякі фізичні закономірності виникнення вібрацій залишаються недостатньо вивченими та використовуються у вигляді гіпотез. У роботах Tlusty I. [1], Tobias S. A. [2] та Merritt H. E. [3] були визначені межі вібраційної стійкості верстатів, представлені у вигляді діаграм граничної ширини (глибини) різання та частоти обертання шпинделя. Автори вважали, що основною умовою збудження вібрації є різання за вібраційним слідом, залишеним на поверхні різання від попереднього обороту деталі або проходу інструменту. На їх думку, умови збудження регенеративної вібрації зберігаються для всіх видів різання (свердління, фрезерування, точіння, шліфування, тощо). Також основним методом визначення вібростійкості механічної обробки залишається побудова пелюсткових діаграм стійкості. При цьому межі стійкості роботи

верстатів визначають у широкому діапазоні частоти обертання шпинделя. Чергування пелюсток з вібрацією та без вібрації на отриманій діаграмі дослідники пов'язують з регенеративним ефектом на поверхні різання.

Метою дослідження була перевірка методу використання пелюсткових діаграм стійкості для прогнозування вібрацій при точінні та виявлення залежності між інтенсивністю вібрації при постійній швидкості різання і частотою обертання шпинделя.

Проведено серію експериментів по точінню диску зі сталі 45 різцем-осцилятором з одним ступенем свободи в напрямку зміни товщини шару, що зрізається [4]. Експерименти проводилися при частотах обертання шпинделя від $n = 100$ об/хв до $n = 700$ об/хв, при цьому інші режими різання залишалися постійними.

Аналіз отриманих результатів показав, що інтенсивність вібрацій значно залежить від швидкості різання та практично не залежить від частоти обертання шпинделя. Це дозволяє критично розглянути підходи, що ґрунтуються на пелюсткових діаграмах стійкості. Але, для більш широкого застосування запропонованої теорії необхідні подальші експерименти з різними матеріалами та інструментами, а також з урахуванням зміни інших режимів обробки.

Список літератури

1. Тлусты И. Автоколебания в металлорежущих станках / И. Тлусты / пер. с чеш. – М. : Машгиз, 1956. – 395 с.
2. Tobias S. Theory of Regenerative Machine Tool Chatter / S. Tobias, W. Fishwick // The Engineer. – 1958. – №1. – С. 199–203
3. Merritt H. Theory of Self-Excited Machine Tool Chatter Trans / H. Merritt // ASME Journal of Engineering for Industry. – 1965. – № 87. – С. 447–454. DOI: 10.1115/1.3670861.
4. Пат. UA 157016 МПК (2024.01) B23B 27/00 Різець-осцилятор для дослідження процесу різання / Внуков Ю. М., Тришин П. Р., Дядя С. І., Козлова О. Б. – u 202401426 ; заявл. 18.03.2024; опубл. 29.08.2024, Бюл. № 35.

УДК 629.7.03

Півень І. П.
аспірант, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

ВСТАНОВЛЕННЯ Й ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСІВ ВАЛЬНИЦЬ НА ПІДСТАВІ ЇХ РЕСУРСНИХ ВИПРОБУВАНЬ НА ВАЛЬНИЧНОМУ СТЕНДІ

Безперервне удосконалення двигунів літальних апаратів диктує тенденцію підвищення ресурсу, зниження маси та габаритів авіаційного двигуна. Ресурс двигуна в значній мірі залежить від ресурсу вальниць, а також системи змащування в цілому. В свою чергу, ресурс вальниць напряму залежить від якості змащування та ступеня охолодження елементів вальниці.

З метою скорочення обсягу дорогих стендових випробувань вальниць у складі газотурбінних двигунів (при встановленні й підвищенні їм ресурсів із забезпеченням надійності їхньої роботи, використовують два методи встановлення (підвищення) ресурсу вальницям [1]:

1. На підставі розрахункової оцінки довговічності з наступним підтвердженням у підконтрольній експлуатації;

2. На підставі результатів ресурсних випробувань у складі виробу або на вальничному (ресурсному) стенді, з забезпеченням умов роботи вальниці як і у складі виробу.

Встановлення й підвищення ресурсів вальницям на підставі їх ресурсних випробувань на вальничному стенді виконуються при позитивних результатах випробувань не менше двох вальниць на вальничному стенді по програмі пришвидшених еквівалентних випробувань за встановлюваний ресурс [2].

На рисунку 1 показано зовнішній вигляд випробувальної головки з приводом стенду



Рисунок 1 – Зовнішній вигляд випробувальної головки з приводом стенду

Технологія виробництва і ремонту

Вальничний стенд забезпечує:

- проведення випробувань одночасно двох вальниць;
- модульну конструкцію для зміни об'єктів випробувань (заміна головки) та завантажувальних пристроїв;
- осьове навантаження дослідних вальниць у статичному режимі та контроль величини осьової статичної загрузки відповідно з програмою випробувань;
- вимір температурних умов роботи та контроль вібраційного стану дослідних вальниць для забезпечення виявлення розвитку на поверхнях та тілах кочення дефектів у процесі випробувань;
- контроль збільшення обертаючого моменту приводного шпинделя, для забезпечення обертання вальниць зі швидкістю, згідно програми випробувань у випадку зростання опору обертання при виявленні розвитку на поверхнях та тілах кочення дефектів у процесі випробувань та забезпечення аварійного зупину установки;
- підводу тепла до корпусу головки для відтворення умов роботи вальниці у газотурбінному двигуні;
- контроль температури олії та частоти обертання валу.

Випробування на вальничному стенді дозволяє зменшити час випробувань за рахунок додаткового навантаження до граничних значень контактної напруги на бігових стежках і тілах кочення при відповідних обертах та умовах змащування.

Враховуючи виконання перерахованих умов, які забезпечує вальничний стенд (імітувати та контролювати величини навантажень, які сприймають вальниці під час роботи у складі газотурбінних двигунів), обґрунтована можливість встановлення й підвищення ресурсів вальницям на підставі їхніх ресурсних випробувань на вальничному стенді по програмі пришвидшених еквівалентних випробувань за встановлюваний ресурс.

Список літератури

1. ДСТУ (ISO 281:2017). Вальниці кочення. Динамічна вантажопідймальність і номінальний ресурс [Текст] Надано чинності 2017-10-01. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2017.
2. Сертифікаційні вимоги для двигунів CS-E, EAAS [Електронний ресурс], 2005. – Режим доступу: <https://www.easa.europa.eu/regulations>

УДК 338:658.5

Татаринів О. П.
АТ «Мотор Січ», м. Запоріжжя, Україна

**ОСВОЄННЯ ВИРОБНИЦТВА ЗМІННИХ
НЕПЕРЕТОЧУВАНИХ ПЛАСТИН (ЗНП) ДЛЯ ЧОРНОВОЇ
ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ АВІАДВИГУНІВ**

Основні вузли і деталі авіадвигунів складаються з важкооброблюваних матеріалів: жароміцних сталей і сплавів, титанових сплавів. Механічна обробка таких матеріалів характеризується низькою продуктивністю і великою витратою різального інструменту, особливо на токарних чорнових операціях. Нині на таких операціях застосовується інструмент зі змінними непереточуваними пластинами (ЗНП), який практично витіснив напайний інструмент. З метою скорочення витрат на придбання імпортного інструменту з ЗНП на АТ «Мотор Січ» організовано власне виробництво ЗНП.

Для умов одиничного і дрібносерійного виробництва необхідно було розробити широкоуніверсальну геометрію ЗНП для чорнкової і напівчистової обробки з глибиною різання від 0,5 до 7 мм для обробки широкої групи матеріалів, що в основному складається з жароміцних сталей і сплавів на нікелевій основі і титанових сплавів на наступні типорозміри двосторонніх пластин по ISO: WNMG 130612, SNMG 150612, SNMG 190612, CNMG 190612.

При розробці широкоуніверсальної геометрії ЗНП орієнтувалися на класичні універсальні стружкоподрібнювачі для чорнкової (рис. 1а), напівчистової (рис. 1б) і чистової обробки (рис. 1в), враховуючи в першу чергу необхідні елементи геометрії для обробки жароміцних сплавів.

У основу геометрії, що розробляється, було закладені наступні параметри:

- наявність захисної фаски – для міцності різальної кромки при чорновій обробці;
- позитивний передній кут захисної фаски, що перевищує кут нахилу пластини в державці – $>6^\circ$, – для зниження зусиль різання;
- загальна ширина стружкоподрібнювача більше 2 мм – для забезпечення роботи пластини на глибину різання до 7 мм;
- додатковий елемент в середині стружколома – для забезпечення роботи пластини на глибину різання до 1 мм.

У результаті був отриманий стружкоподрібнювач на базі класичного універсального стружка подрібнювача для чорнкової

Технологія виробництва і ремонту

обробки поєднаний з класичним чистовим стружкоподрібнювачем (рис. 2).

З таким стружко подрібнювачем на АТ «Мотор Січ» освоєно виробництво наступних пластин з твердого сплаву BK10XOM: WNMG 130612, SNMG 190612, CNMG 190612, SNMG 150612, які мають широкий діапазон застосування по оброблюваним матеріалам і режимами різання: $S = 0.1-0.5$ мм/о, $t = 0,5-7$ мм.

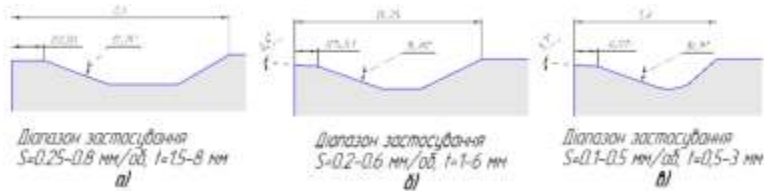


Рисунок 1 – Універсальні стружкоподрібнювачі:
а) чорновий; б) напівчистовий; в) чистовий



Рисунок 2 – Геометрія нового стружкоподрібнювача

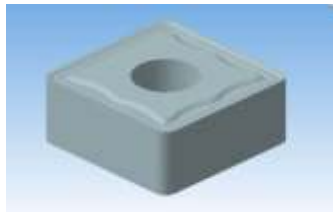


Рисунок 3 – Пластина з новим універсальним стружкоподрібнювачем SNMG 150612 виробництва АТ «Мотор Січ»

З таким стружко подрібнювачем на АТ «Мотор Січ» освоєно виробництво наступних пластин з твердого сплаву BK10XOM: WNMG 130612, SNMG 190612, CNMG 190612, SNMG 150612, які мають широкий діапазон застосування по оброблюваним матеріалам і режимами різання: $S = 0.1-0.5$ мм/о, $t = 0,5-7$ мм.

УДК 621.452.3

Зеленський О. В
студ. гр. Мз-713мНУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Куліш Є. Д.
начальник групи газодинамічних розрахунків АТ Мотор Січ,
м. Запоріжжя, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ АЕРОДИНАМОМЕТРІВ ПРИ ВИПРОБУВАННІ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

Сучасні технології вимагають високої надійності та точності у випробуванні турбовальних двигунів, зокрема у військових і цивільних галузях. У цьому процесі важливу роль відіграють аеродинамометри – обладнання для тестування турбовальних двигунів за допомогою повітряного опору, яке забезпечує точні дані про потужність та інші параметри роботи двигуна.

Аеродинамометри широко застосовуються для тестування турбовальних двигунів вертольотів, суднових установок, а також у сфері електрогенерації. Наприклад, Збройні Сили США використовують VAROC для випробувань двигунів вертольотів Apache, BlackHawk і Chinook [1]. Це критично важливо, адже перед повторною установкою двигуна необхідно забезпечити його безпечну та ефективну роботу, особливо для бойових умов. Також ВМС Швеції застосовують VAROC для випробувань двигунів на корветах класу Visby, що є прикладом сучасного судна з повною технологією малопомітності.

Існують значимі переваги аеродинамометрів у порівнянні з гідравлічними динамометрами. Так, на відміну від гідравлічних динамометрів, VAROC використовує навколишнє повітря як середовище для створення опору, що дає численні переваги, такі як зниження ваги установки, відсутність необхідності в складному охолоджувальному обладнанні та спрощення системи обслуговування та ремонту.

До того ж аеродинамометри можна використовувати як у стаціонарних випробувальних стендах на виробництві, так і в умовах польових ремонтних майстерень, що робить цей динамометр універсальним. Мінімальні вимоги до допоміжного обладнання значно спрощують експлуатацію, зменшуючи витрати. Здатність працювати в умовах екстремальних температур і вологості дозволяє

Технологія виробництва і ремонту

випробовувати турбовальні двигуни у будь-якому кліматі, будь то спека, мороз, посуха або висока вологість.

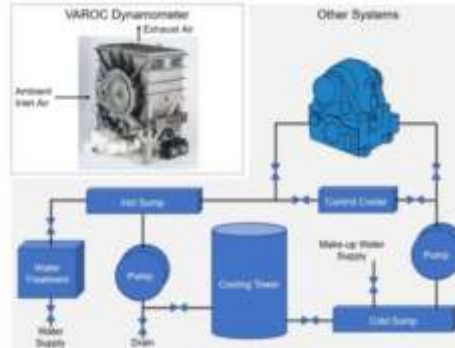


Рисунок 1 – Порівняння необхідного додаткового обладнання для гідрогальма (синій колір) та аеродинамометра



Рисунок 2 – Повітряний динамометр V35 налаштований для тестування двигунів вертольота в умовах великої висоти/низьких температур [1]

Використання аеродинамометра значно знизить витрати при випробуваннях турбовальних двигунів, особливо в польових умовах, завдяки спрощеній установці та мінімальним вимогам до допоміжного обладнання. Використання повітря як середовища для створення опору виключає необхідність у складних системах охолодження та додаткових витратних матеріалах, характерних для гідравлічних динамометрів. Крім того, аеродинамометри компактні та легкі, що знижує транспортні витрати та дозволяє проводити тестування без значної підготовки місцевості чи спеціальних умов, що особливо актуально для мобільних або тимчасових випробувальних майданчиків.

Список літератури

1. VAROC® AirDynamometersForreliable, low-maintenanceloadtestingofgasturbineengines [Електронний ресурс] <https://www.conceptsnrec.com/dynamometers>

УДК 621.793.74

Сахно С. С.
начальник бюро досліджень УГМет, АТ «Мотор Січ»,
м. Запоріжжя, Україна

Григоренко М. С.
інженер-технолог, АТ «Мотор Січ»,
м. Запоріжжя, Україна

Панченко П. Ю.
начальник технологічного бюро, АТ «Мотор Січ»,
м. Запоріжжя, Україна

Тітаренко І. О.
металізатор, АТ «Мотор Січ», м. Запоріжжя, Україна

Білаш Д. І.
інженер-технолог, АТ «Мотор Січ»,
м. Запоріжжя, Україна

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЩІЛЬНОСТІ ПОКРИТТЯ НА РОБОЧІЙ ПОВЕРХНІ КРИШКИ ВЦК ДЛЯ ВІЛЬНОГО ПРОХОДЖЕННЯ НАДЗВУКОВОГО ГАЗОВОГО ПОТОКУ

Кришка відцентрового компресора (ВЦК) є важливою деталлю компресора газотурбінного двигуна (ГТД), яка служить для формування потоку, що проходить через компресор, і підвищення його тиску до надзвукових швидкостей.

Кришка виготовлена зі сплаву ЭП648-ВИ та має складний профіль який отримують обробкою заготовки на верстатах із ЧПК. На внутрішню робочу поверхню кришки наноситься латунне покриття Л-63 плазмовим напиленням (APS).

Для напилення на АТ «Мотор Січ» раніше застосовувався порошок ПР-Л63 з фракційним складом 40...100 мкм, виробництва ПОЛЕМА. При цьому забезпечувалися вимоги, що висуваються до покриття згідно з технічною документацією, а саме: міцність зчеплення покриття з основою 5,9 кгс/мм² (при вимозі не менше ніж 3,0 кгс/мм²); шорсткість покриття після полірування Ra0,4.

Однак періодично після механічної обробки та полірування покриття на поверхні залишалися несущільності, які перешкоджають ідеальному проходженню надзвукового потоку через утворення завихрень, що зі свого боку призводить до зниження ККД двигуна. Такі деталі пропускалися на двигун в окремих випадках спеціальними конструкторськими рішеннями.

Технологія виробництва і ремонту

Наразі, зважаючи на відсутність постачальника ПР-Л63 в рамках імпортозаміщення, запропоновано його аналог за хімічним і гранулометричним складом, порошок NES6337, виробництва LINBRAZE. Під час застосування цього порошку кінцевий результат (пористість, несущість) різко погіршився, внаслідок чого в деяких випадках доводиться виконувати перенапилення кришок. Мікроструктурний аналіз стружки зібраної після механічної обробки показав, що стружка з бездефектних ділянок має щільнішу структуру, ніж стружка в місцях дефектів, яка має рихлу структуру.

Визначення впливу режимів напилення на щільність покриття, виконаного порошком NES6337, виконувалося на зразках-імітаторах у порівнянні з покриттям ПР-Л63. Відмінною особливістю напилення зразків порошком NES6337 від наявної технології було підвищення сили струму та застосування газу «гелію» спільно з аргоном для збільшення температури плазми.

Мікроструктурне порівняння щільності покриття показало, що з наведених зразків щільніша структура спостерігається у покритті, виконаного порошком ПР-Л63 за серійною технологією, менш щільна структура у покритті NES6337 напиленого в чистому Ag із підвищеною силою струму. Структура покриття NES6337, нанесеного з додаванням гелію, що підвищує температуру плазми, має по всій товщині значну пористість і несущість, а також на поверхні присутні розшарування покриття глибиною до 250 мкм.

Таким чином, оптимальним режимом для напилення покриття порошком NES6337 є напилення у чистому Ag з підвищенням сили струму відносно серійної технології. Результати міцності зчеплення на даному режимі також показали задовільні результати 5,2 кгс/мм², при вимозі технологічної документації не менше 3,0 кгс/мм².

Коригування режимів при застосуванні порошку NES6337 (аналог ПР-Л63) дало змогу знизити кількість і розмір пор і несущостей у покритті, що підвищило щільність і якість покриття після механічної обробки кришок ВЦК.

Так як пористість властива всім газотермічним покриттям, пропонується розглянути можливість створення контрольних зразків у серійному виробництві на наявність і розмір пористості на поверхні після механічної обробки, що не чинить істотного впливу на проходження надзвукового газового потоку і не знижує показники ККД двигуна.

УДК 621.9

Дядя С. І.
канд. техн. наук, доцент, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Карамушка Д. Р.
студентка, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОСТІ РІЗАННЯ ПРИ КІНЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ

Основним завданням машинобудівних виробництв залишається забезпечення ринку продукцією, що очікується споживачами. Для цього основна увага приділяється якості виробам, що випускається, та продуктивності. В умовах ощадливого виробництва кількість матеріалу, що використовується в деталях, та їх конструкції прораховуються на етапі проєктування таким чином, щоб забезпечувати надійність при експлуатації та не мати зайвої ваги. Тому в багатьох випадках вони мають тонкостінні елементи. Через те, що основним формоутворюючим обладнанням є металорізальні верстати, обробка на них таких деталей супроводжується вібраціями, які негативно впливають на її якість, стійкість інструменту та продуктивність. Тому актуальною стоїть задача забезпечення сталого різання, попереджуючи появу коливань.

Для того, щоб це впровадити треба знати закони їх виникнення. Дослідженнями [2] встановлено, що при кінцевому фрезеруванні через обмежений час різання діють вимушені коливання, на які накладаються супроводжуючі вільні коливання деталі. Сучасні фрезерні верстати мають можливість працювати в умовах, коли супроводжуючі вільні коливання не встигають виникнути і при різанні діють тільки вимушені коливання. Для створення при цьому сталих умов різання треба провести дослідження взаємозв'язку між частотою вимушених коливань та частотою вільних коливань деталі, щоб при фрезеруванні зуб інструменту завжди врзався в одному положенні деталі відносно положення пружної рівноваги.

Список літератури

1. Influence of cutting time on types of oscillations during blade processing. /Y Vnukov, SI Dyadya, OB Kozlova, PR Trishin, AE Zubarev // Ukr. J. Mech. Eng. Mater. Sci. volume 9, issue 1, P. 53–66.

Криворученко В. Л.
аспірант, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Гончар Н. В.
канд. техн. наук, доцент, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

СУЧАСНІ ТА ПЕРСПЕКТИВНІ МЕТОДИ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНОГО ДВИГУНА

Підвищення експлуатаційних вимог до літальних апаратів тягне за собою насамперед підвищення вимог до їхніх установок, які виробляють енергію руху. Складність завдання конструктора на етапах проектування нових або модернізації наявних двигунів полягає в тому, щоб розрахувати, змоделювати і задати всі необхідні вимоги до конструкції проточної частини як усієї роторної машини, так і окремих її деталей. Мета інженера, зайнятого виготовленням, забезпечити точне виконання всіх закладених у конструкцію деталі вимог, використовуючи технології та досвід свого виробництва. Для підвищення продуктивності та скорочення часу виготовлення, а також витрат на виробництво, інженер у своїй роботі має використовувати технології і передовий світовий досвід обробки подібних деталей, особливо відповідальних, навантажених, та тих, що мають складну геометрію поверхонь.

Основним показником якості виготовленої деталі є шорсткість її робочих поверхонь. Шорсткість поверхні деталей траку роторних машин, що мають специфічну кривизну профілю, істотно впливає на їхні аеродинамічні характеристики, наприклад, лопатки моноколес з важкодоступними для фінішної обробки місцями.

Традиційними технологічними методами досягнення необхідних параметрів шорсткості на поверхні лопаток є механічна та хімічна обробки. На сьогоднішній день, на вітчизняних підприємствах найбільше застосування знайшли механічні методи, які в основному здійснюються абразивними інструментами.

Вивчаючи передовий досвід авіаційних підприємств, можна відзначити, що у якості фінішної обробки дедалі ширшого застосування знаходить сухе електрополірування за технологією DryLute [1]. Це інноваційна технологія, яка на сьогоднішній момент є революційною в галузі полірування металевих поверхонь. Як і під час полірування в рідкому середовищі, метод сухого полірування

Технологія виробництва і ремонту

ґрунтується на розчиненні поверхневих шарів матеріалу в хімічно активному середовищі під впливом електричного струму.

Особливості цієї технології такі.

Для обробки використовуються спеціальні гранули, просякнені електролітом. Вони відіграють роль електродів, створюючи локальні електричні поля в зоні контакту з деталлю.

Під час подачі електричного струму між деталлю і гранулою, виникає електрохімічна реакція на поверхні деталі, що сприяє видаленню матеріалу.

Одночасно з електрохімічним процесом, гранули механічно впливають на поверхню, видаляючи мікронерівності та поліруючи матеріал.

Переваги цього методу наступні.

Більш висока швидкість обробки, ніж при звичайному електрополіруванні. Комбінація електрохімічного і механічного впливу дає змогу прискорити процес полірування.

Можливість обробки складних профілів. Контакт деталі з електролітом здійснюється локально через гранули, забезпечуючи рівномірну обробку необхідних поверхонь.

Точніший контроль процесу: завдяки регулюванню параметрів електричного струму і складу електроліту можна досягти не тільки високої якості полірування, а й заданої точності.

З огляду на сказане вище, можна бути впевненим, що застосування сухого електрополірування за технологією DryLyte на вітчизняних машинобудівних підприємствах знайде своє місце в обробці таких складнопрофільних деталей, як моноколеса, відцентрові колеса, які мають велику кривизну лопаток, в обробці контактних поверхонь обойм підшипників та інших деталей, де необхідно отримати високі параметри якості, зокрема, шорсткості поверхонь за умови забезпечення високої точності їхніх розмірів.

Список літератури

1. DryLyte Electropolishing. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.pres-x.com/drylyte-electropolishing/>

УДК 621.9.02

Веркалець А. А.
аспірант, Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

Іванів І. В.
студент, Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

Онисько О. Р.
д-р техн. наук, професор, Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, Україна

Барц Крістіан
PhD, професор, Технічний університет Клуж-Напока, Північний
університетський центр, м. Бая-Маре, Румунія

ПРОБЛЕМИ ТОЧНОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ТРАПЕЦІЄВИДНОГО ПРОФІЛЮ ХОДОВИХ ГВИНТІВ

Ходові гвинти з трапецієвидною різьбою дуже широко використовують для забезпечення руху подачі металорізальних верстатів, 3В-принтерів і у інших машинах та механізмах. Значна частина з них працюють в умовах великого навантаження і спрацювання. Тому актуальним є виготовлення саме гвинтів (не ходових гайок) із високими зносостійкими характеристиками. До них відноситься твердість. Висока міцність для таких гвинтів теж є пріоритетною особливістю.

Оскільки найбільш поширеною технологією виготовлення ходових гвинтів є точіння, або вихрове точіння, то найбільшою вимогою до інструмента – різця є його стійкість в умовах виготовлення нарізі на заготовках із високими показниками твердості (наприклад понад 50 HRC) та міцності (наприклад межа міцності понад 1200 МПа). За таких умов різець повинен мати спеціально підібраний передній кут, наприклад $\gamma = 4\text{--}15^\circ$ і вимагатиме корекції профілю різальної крайки (рис. 1). Профіль передньої поверхні (на рис.1 виділено помаранчевим кольором) за умов значної величини переднього кута очевидно відрізнятиметься від профілю різби ходового гвинта.

У координатах ZX (рис.1) цей нелінійний профіль визначатиметься за трансцендентним рівнянням [1]:

$$Z(x) = tg(\alpha)x \frac{\sin \tau}{\sin \gamma} - \frac{P\tau}{2\pi}, \quad (1)$$

$$\text{де } \tau = \gamma - \arcsin\left(\frac{d_{\min or}}{2x} \sin \gamma\right),$$

α – півпрофільний кут нарізі, який для трапецієвидних гвинтів становить 30° ; $d_{\min or}$ – діаметр впадин нарізі, P – крок нарізі.

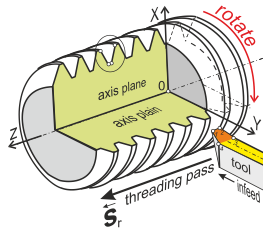


Рисунок 1 – Схема точіння нарізової трапецієвидної поверхні

Проте усі відомі виробники різьбових інструментів виготовляють їх із профілем різальної крайки 4-1-2-3 ідентичними до профілю заданої наріз D-A-B-C (рис. 2).

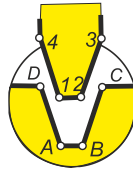


Рисунок 2 – Схема відповідності профілів нарізового різця та нарізі

Список літератури

1. Onysko, O. Analytical Model of Tapered Thread Made by Turning from Different Machinability Workpieces [Electronic resource] / O. Onysko, V. Kopei, C. Barz, et. al. // Machines. – 2024. Vol. 12. – No. 5. 313. <https://doi.org/10.3390/machines12050313>

УДК 621.914

Дядя С. І.
канд. техн. наук, доцент, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Яхно Д. А.
аспірант, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМАТИКИ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ З КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

Розвиток наукомісткої техніки нерозривно пов'язаний з розробкою нових конструктивних рішень, прогресивних технологій, удосконаленням існуючих або створенням нових матеріалів. Серед перспективних матеріалів останнім часом велика увага приділяється впровадженню композитних матеріалів, які за рахунок своїх унікальних властивостей, а саме високої міцності, великої ударної в'язкості, стійкості до корозії та малої питомої ваги, успішно замінюють металеві конструкції та значно підвищують експлуатаційні характеристики кінцевого виробу. Особливо це актуально при виробництві сучасної авіаційної та ракетно-космічної техніки [1]. Створення конструкцій вузлів з використанням композитних матеріалів суттєво підвищує конкурентоздатність кінцевого виробу через зменшення ваги, витрачання пального, полегшення обслуговування та інших переваг.

Особливістю технологічного процесу виготовлення деталей з композитних матеріалів є можливість отримання складних профільних поверхонь при формуванні. Але, незважаючи на це, потреба у подальшій механічній обробці все ще залишається. Найбільш поширеними методами формоутворення при різанні є фрезерування, токарна обробка, свердління.

Незважаючи на наявні переваги експлуатаційних характеристик, дані матеріали важко обробляються, що робить неможливим ефективно використовувати традиційні рекомендації, що пропонуються при обробці різанням сталей та сплавів.

Основні види дефектів на поверхнях деталей з композитних матеріалів, що з'являються після обробки різанням, включають нерівномірну шорсткість, велику хвилястість, вириви та сколи, розшарування волокна та ворсистість, тріщини, припали, відхилення форми та взаємного розташування поверхонь [2].

На це впливають [3]:

Технологія виробництва і ремонту

а) анізотропія властивостей матеріалів, внаслідок чого деформації не передаються через шарувату структуру і сполучну смола, а відбувається руйнування його структури у вигляді поздовжніх тріщин;

б) висока твердість і характеристики міцності волокна композитних матеріалів, що перешкоджають нормальному процесу різання, викликаючи зростання сили опору різанню;

в) висока твердість наповнювача та його абразивний вплив на різальний інструмент, що викликають його підвищений знос.

г) низька теплопровідність композитів, яка суттєво впливає на співвідношення складових теплового балансу при різанні, підвищення температури, що супроводжують обробку різанням, і викликає руйнування хімічних зв'язків молекулярних ланцюгів полімеру, появу припіку з утворенням коксового шару, виділення газоподібних продуктів розпаду і потемніння на поверхні матеріалу.

д) високі пружні властивості композитних матеріалів, що впливає на виникнення вібрації та підвищене зношування інструменту по задній поверхні через інтенсивні контактні явища.

Фірми, що займаються випуском різального інструменту, надають пропозиції щодо використання різноманітних ріжучих матеріалів при обробці деталей з композитів. При цьому перевага надається надтвердим матеріалам. Але заходи щодо забезпечення сталих умов різання залишаються малодослідженими.

Проведений аналіз літературних джерел з механічної обробки композитних матеріалів показав, що на сьогоднішній день впроваджується їх широка номенклатура, для кожної з яких проведено недостатньо досліджень щодо обґрунтованих рекомендацій по призначенню режимів різання, створенню умов безвібраційної обробки. Крім цього актуальним є дослідження впливу геометрії різальних інструментів на якість обробленої поверхні шаруватих матеріалів.

Список літератури

1. Machining: fundamentals and recent advances / J. Paulo Davim. – Springer-Verlag London Limited, 2008. – 368 с.
2. Machining of composite materials / R. Teti // Annals of the CIRP. – 2002. – Vol. 51/2. – P. 611–634.
3. Technological peculiarities in composite parts machining / Markov, A.M. // Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering. – No.7 (37). – 2014. – P. 3–8.

УДК 621.621.45.032.3

Котов М. М.

інженер-технолог, ПАТ «Мотор Січ»,
м. Запоріжжя, Україна

Сахно С. С.

начальник бюро, ПАТ «Мотор Січ»
м. Запоріжжя, Україна

Снесарь С. Б.

аспірант, Національний університет «Запорізька політехніка»
м. Запоріжжя, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ФАКТОРІВ НАДІЙНОЇ РОБОТИ ДЕТАЛЕЙ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ПЛАЗМОВИХ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У СКЛАДІ АВІАЦІЙНОГО ДВИГУНА

У сучасній авіаційній промисловості зростаюча конкуренція та необхідність підвищення ефективності та надійності авіаційних двигунів вимагають впровадження новітніх виробничих технологій. Плазмові адитивні технології (ПАТ) є перспективним інструментом, оскільки дозволяють створювати деталі складної геометрії та високої точності, що значно скорочує трудомісткість, знижує витрати на матеріали та зменшує кількість відходів. Деталі, отримані методом ПАТ, забезпечують високу міцність, жаростійкість і стійкість до зношування, що робить їх привабливими для авіаційної галузі.

Метою дослідження є аналіз та визначення основних факторів, які забезпечують надійну роботу авіаційних деталей, виготовлених методом плазмового адитивного наплавлення. Увага приділяється впливу таких чинників, як хімічний склад наплавленого металу, наявність дефектів, мікроструктура матеріалу, а також параметри режиму плазмового наплавлення, на експлуатаційні властивості виробів.

Об'єктом дослідження є деталі авіаційних двигунів, виготовлені методом плазмового адитивного наплавлення (ПАТ) з використанням жароміцних нікелевих сплавів. Випробування проводилися на зразках, виготовлених на установці Starweld 190HP. Після наплавлення зразки пройшли термічну обробку для покращення фізико-механічних характеристик.

Результати дослідження

1. Хімічний склад наплавленого металу є ключовим фактором, що впливає на механічні властивості деталей. Встановлено, що склад металу, отриманого в процесі наплавлення, залежить від складу порошку, а також ефективності захисту аргоном під час наплавлення. Контроль вмісту газів та легувальних елементів дозволяє запобігти утворенню крихких фаз, що підвищує міцність та довговічність деталей.

2. Дефекти, що виникають під час наплавлення, такі як тріщини, пористість, хімічна ліквіація та частки нерозплавленого порошку, мають значний вплив на механічні властивості деталей. Тріщини можуть виникати як наслідок недостатнього сплавлення між шарами або в результаті термічних напруг, що з'являються під час процесу. Наявність пор може бути спричинена газовими бульбашками, які не встигають вийти на поверхню, або внутрішньою мікропорозністю часток порошку. Усі ці дефекти негативно впливають на якість та міцність деталей, тому їх мінімізація є необхідною для забезпечення надійності.

3. Мікроструктура наплавленого металу. Вивчення мікроструктури матеріалу дає можливість аналізувати динаміку зростання осаджуваного шару, розташування зерен та сегрегацію елементів. Оптимальна дрібнозерниста структура сприяє підвищенню механічної міцності та стійкості до термічних циклів. При дослідженні зразків виявлено, що мікроструктурні зміни, такі як перебудова дислокацій, виділення вторинних фаз та рекристалізація, значно впливають на теплофізичні властивості матеріалу.

4. Параметри режиму плазмового наплавлення. Параметри наплавлення, зокрема потужність плазми, швидкість подачі порошку, швидкість переміщення плазмотрона та температура попереднього підігріву, мають значний вплив на структуру та властивості наплавленого металу.

Отримані результати свідчать, що впровадження плазмового адитивного наплавлення дозволяє значно підвищити ефективність та надійність виробництва авіаційних деталей, знижуючи витрати матеріалів та скорочуючи час виготовлення. Оптимізація технологічних параметрів процесу сприяє зростанню конкурентоспроможності вітчизняної авіаційної промисловості.

УДК 621.771

Федосєєва В. О.

студ. гр. М-813м, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Матюхін А. Ю.

канд. техн. наук, доцент, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

ВДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ, ЩО ВИКОРИСТОВУЄТЬСЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРА ГТД

Лопатки – основні елементи газотурбінного двигуна (ГТД). Компресор і турбіна ГТД виконані у вигляді лопаткових машин. Виготовлення лопаток займає особливе місце в сучасному двигунобудуванні. Це зумовлено їх відповідальним призначенням, великою кількістю лопаток у ГТД і високою вартістю матеріалів, що зумовлює необхідність мінімального відсотку браку.

До основних проблем виготовлення заготовок лопаток належать:

- різка відмінність у геометричних розмірах і площах поперечних перерізів замкової частини та пера лопатки;
- складна геометрія пера лопатки та тонке полотно, товщина якого сумірна з висотою облою;
- специфіка пластичної деформації матеріалу, що штампується [1].

Основними напрямками у виробництві заготовок лопаток ГТД методом гарячого штампування є штампування на гвинтових і кривошипних гаряче штампувальних пресах.

Для виготовлення лопаток компресора ГТД використовують титанові сплави. Від матеріалу потрібна висока міцність до температур близько 600°C, низька щільність, висока ударна міцність і опір втомі. Такими характеристиками володіє сплав ВТ6.

Найкращі умови для отримання заготовок зі сплаву ВТ6 досягаються при штампуванні на пресах. Значне порівняно зі штампуванням на молотах зниження швидкості деформування викликає зменшення опору деформуванню і теплового ефекту деформування.

На гвинтових пресах під час штампування до упору штампів вдається отримати поковки з підвищеною на 1-2 класи точністю

порівняно з КГШП. Тому для штампування лопаток компресора ГТД доцільніше використовувати гвинтові преси.

Деформування титанових сплавів характеризується більш ускладненим затіканням металу в глибокі та вузькі порожнини штампa. Це пояснюється підвищеним опором деформуванню титану, значним тертям між металом і інструментом і більш інтенсивним охолодженням контактних шарів заготовки. Тому слід збільшувати штампувальні ухили і радіуси заокруглень, а також застосовувати мастило.

Штампування титанових сплавів вимагає обов'язкового підігріву інструменту. Температура нагріву має бути тим вищою, чим нижча швидкість деформування.

Конструкції гвинтових пресів мають суттєвий недолік – підвищення швидкості зворотного ходу збільшує енергію, накопичувану маховиком, яку треба або гасити гальмом, або зменшувати час роботи головного приводу на зворотному ході [2].

Для підвищення ефективності пропонуються наступні конструктивні рішення:

- використання пневмогідравлічних накопичувачів [3];
- конструкція повзуна з гайкою, яка дає можливість виключити маховик зі зворотного ходу як основний накопичувач кінетичної енергії [4].

Попередній аналіз показує достатню ефективність розглянутих конструкцій.

Список літератури

1. Обдул В. Д. Особливості, пов'язані зі штампуванням лопаток ГТД / В. Д. Обдул, С. М. Фокін, В. О. Федосєєва // Тиждень науки-2024. Машинобудівний факультет. Тези доповідей науково-практичної конференції, Запоріжжя, 15-19 квітня 2024 р.[Електронний ресурс] / Редкол.: Вадим Шаломєєв (відпов. ред.) Електрон. Дані.- Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2024. - 1 електрон. опт. Диск (DVD-ROM); 12 см. – Назва з тит. екрана. – С. 93-94.
2. Бочаров Ю. А. Гвинтові преси / Бочаров Ю. А. – М. : Машинобудування, 1976. 247 с. з іл.
3. А.С.СРСР № 517509. Гвинтовий прес. М.М. Половина; В.Д. Обдул; Ю.Н. Половина. Публ. 15.06.76. БН № 22.
4. Патент України №127676 МПК В30В 1/18 (2006.01). Гвинтовий прес. В. Д. Обдул, А. Ю. Матюхін, В. В. Широкобоков, Д. В. Обдул, Т. Г. Матюхіна, Н. І. Висоцька. Заявл. від 28.06.22, опубл. 22.11.2023, бюл. №47.

УДК 621.822.6

Безлюдний О. В.
аспірант, Національний університет «Запорізька політехніка»
начальник відділу, «АТ Мотор Січ»

Бабенко О. М.
канд. техн. наук, доцент, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗКОНТАКТНОЇ ІМПУЛЬСНО-МАГНІТНОЇ ОЧИСТКИ НЕРОЗБІРНИХ ВАЛЬНИЦЬ

Ефективність технології безконтактної імпульсно-магнітної очистки нерозбірних вальниць можна розглядати за кількома аспектами: ступінь видалення забруднень, збереження цілісності поверхні, економічна доцільність і загальний вплив на експлуатаційні характеристики підшипників.

1. Ступінь видалення забруднень

Імпульсно-магнітна очистка дозволяє ефективно видаляти різні види забруднень, такі як мастильні залишки, пил, металеві частинки та інші дрібні фракції. Дослідження показують, що під впливом електромагнітних імпульсів забруднення розщеплюються на дрібніші частинки і відділяються від поверхні підшипника. Це забезпечує високу якість очистки навіть у важкодоступних місцях та на поверхнях зі складною геометрією [1].

2. Збереження цілісності поверхні

Однією з ключових переваг імпульсно-магнітного очищення є відсутність механічного контакту, що мінімізує ризик утворення подряпин, тріщин або інших пошкоджень на поверхні підшипника. Це особливо важливо для нерозбірних вальниць, де будь-яке пошкодження може призвести до зниження продуктивності або скорочення терміну служби деталі. Вплив електромагнітних імпульсів є достатньо сильним для видалення забруднень, але не настільки інтенсивним, щоб пошкодити матеріал підшипника [2].

3. Вплив на експлуатаційні характеристики підшипників

Після застосування імпульсно-магнітної очистки, підшипники демонструють покращені експлуатаційні характеристики, включаючи зниження коефіцієнта тертя та підвищення точності обертання. Це пов'язано з тим, що очищена поверхня не містить залишкових частинок, які можуть вплинути на рівномірність руху і сприяти передчасному зносу.

4. Порівняння ефективності імпульсно-магнітної очистки з промивкою вальниць мастилом за технологією АТ «Мотор Січ»

Після видалення консерваційної змазки розпакованих підшипників FAG 594775 (1 категорії) в середі масла Turbo Oil 2380 середні показники склали: віброприскорення – $3,0 \text{ м/с}^2$; віброшвидкість – $1,7 \text{ мм/с}$. Після очистки за технологією безконтактної магнітно-імпульсної очистки нерозбірних вальниць на стенді ОПШ-05 їх віброхарактеристики значно покращились і в середньому склали: віброприскорення – $1,6 \text{ м/с}^2$; віброшвидкість – $1,0 \text{ мм/с}$. Після використання технології безконтактної імпульсно-магнітної очистки при частоті обертання 1800 хв^{-1} рівень вібрацій зменшився на 40...45% [3]. Хімічний склад мікрочастинок видалених в процесі безконтактного очищення нерозбірних вальниць, показав що з тракту кочення були видалені частинки розміром 25...45 мкм, їх кількість склала 11%, 10...25 мкм -10 %, 5...10 мкм – 55%, а залишкові 24% склали частинки розміром до 5мкм.

Висновок. Ефективність технології безконтактної імпульсно-магнітної очистки підтверджується низкою факторів: глибоке очищення, безпека для поверхні, економічна вигода та покращення експлуатаційних характеристик підшипників. Завдяки цим перевагам дана технологія стає перспективною для широкого впровадження в різних галузях промисловості.

Список літератури

1. Аксьонов О.Ф. Підвищення функціональної якості підшипників кочення шляхом електромагнітного очищення / О. Ф. Аксьонов, Р. Є. Костюнік, О. В. Куцев // Проблеми тертя та зношування. – К. : НАУ, 2008. – Вип.49. – Т. 1. – С. 9–13.
2. Применение бесконтактной магнитно-турбулентной очистки шарикоподшипников в авиационном двигателестроение / Пейчев Г. И., Колесник П. А., Мурашкин Е. И. и др. – 2014.
3. ДСТУ ISO 15242-1:2016 Підшипники кочення. Методи вимірювання вібрації. Частина 1. Основні положення (ISO 15242-1:2015, IDT).

УДК 621.9.048.4:621.787.6

Подобний О. В.
аспірант, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Мордюк Б. М.
доктор фіз-мат. наук, с.н.с., Інститут металофізики
ім. Г.В. Курдюмова НАНУ,
м. Київ, Україна

Павленко Д. В.
доктор техн. наук, проф., НУ «Запорізька політехніка»
м. Запоріжжя, Україна

Торба Ю. І.
канд техн. наук, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

ВПЛИВ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОГО РІЗАННЯ ТА УЛЬТРАЗВУКОВОГО МОДИФІКУВАННЯ НА ЯКІСТЬ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

Виготовлення деталей авіаційних двигунів характеризується дрібносерійним виробництвом та необхідністю формування складнопрофільних поверхонь. Електроерозійне різання (ЕЕР) металевим дротом є перспективним методом формоутворення, що дозволяє повністю автоматизувати процес та забезпечити гнучкість у створенні складних геометричних форм. Проте його широке впровадження стримується негативним впливом термічно модифікованого поверхневого шару на експлуатаційні характеристики деталей.

Під час електроерозійного різання відбувається оплавлення поверхні та локальне підвищення температури в поверхневих шарах оброблюваного матеріалу, що призводить до формування несприятливої топографії поверхні, зміни її структурно-фазового стану та виникнення залишкових напружень розтягу. Ступінь термічного пошкодження залежить від режимів різання та матеріалу дроту-електроду. Актуальним завданням є визначення оптимальних режимів ЕЕР та розробка методів фінішної обробки для забезпечення необхідної якості поверхні.

В роботі досліджено вплив режимів електроерозійного різання та фінішного високочастотного ударного оброблення (ВЧУО) ультразвуковим інструментом зразків з нікелевого сплаву

Технологія виробництва і ремонту

ХН73МБТЮ на якість поверхні. Оцінювання якості проведено на основі комплексного аналізу змін мікрорельєфу поверхні, хімічного та фазового складу, мікроструктури та твердості поверхневого шару.

Досліджено зразки жаростійкого нікелевого сплаву ХН73МБТЮ після:

- електроерозійного різання латунним дротом у жорсткому (високоенергетичному) та м'якому (низькоенергетичному) режимах;
- електроерозійного різання молібденовим дротом у середньоенергетичному режимі;
- фінішної високочастотної обробки ультразвуковим інструментом.

Встановлено, що підвищення енергії різання латунним дротом призводить до значного зростання концентрації міді та цинку на поверхні: з 3,59% Cu та 2,61% Zn після м'якого режиму до 19,77% Cu і 8,47% Zn після жорсткого режиму. На відміну від цього, електроерозійне різання молібденовим дротом не спричиняє суттєвих змін хімічного складу поверхні та забезпечує стабільність механічних властивостей.

Фінішне високочастотне ударне оброблення забезпечує:

- усунення залишкових напружень розтягу;
- формування сприятливих напружень стиснення ($\sim 1,13$ ГПа);
- зміцнення поверхневих шарів (твердість зростає до 7,2–7,4 ГПа);
- суттєве зменшення параметрів шорсткості Ra в 3–6 разів.

На підставі дослідження якості поверхневих шарів зразків з жароміцного сплаву ХН73МБТЮ встановлено:

1. Оптимальним є використання молібденового дроту для електроерозійного різання, що мінімізує зміни хімічного складу та забезпечує стабільність механічних властивостей поверхні.

2. Фінішна високочастотна обробка поверхні є ефективним методом покращення якості поверхні після електроерозійного різання, що забезпечує зниження шорсткості, усунення концентраторів напружень, формування сприятливого напруженого стану та підвищення твердості поверхневого шару.

3. Запропонована комбінація методів обробки дозволяє підвищити продуктивність виготовлення деталей авіаційних двигунів при забезпеченні необхідних експлуатаційних характеристик.

УДК 621.45.037:621.762:621.77:621.9

Павленко Д. В.
д-р техн. наук, проф., НУ «Запорізька політехніка»
м. Запоріжжя, Україна

Торба Ю. І.
канд техн. наук, НУ «Запорізька політехніка»
м. Запоріжжя, Україна

Федоров С. А.
аспірант, НУ «Запорізька політехніка»
м. Запоріжжя, Україна

ЯКІСТЬ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРУ ВИГОТОВЛЕНИХ З ПОРОШКІВ ТИТАНУ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ ІНТЕНСИВНОГО УЩІЛЬНЕННЯ

Технологія виготовлення деталей газотурбінних двигунів (ГТД) з порошкових титанових сплавів з наступною інтенсивною пластичною деформацією (ПД) є перспективним напрямком розвитку двигунобудування. Проте якість поверхневого шару таких деталей після механічної обробки потребує детального дослідження. Відомо, що титан та сплави на його основі значно поступаються за теплопровідністю більшості кольорових сплавів. Крім того, мале відношення відносного подовження до границі міцності та наближення границі текучості до границі міцності свідчить про низьку пластичність титану. Враховуючи відносно високу твердість сплавів на основі титану, а також вказані відмінності теплофізичних і механічних властивостей, механічна обробка виробів з них пов'язана з рядом труднощів.

Метою роботи є встановлення закономірностей формування характеристик поверхневого шару лопаток компресора з титанових сплавів, отриманих за технологією інтенсивного ущільнення порошкової суміші, при механічній, оздоблювальній та зміцнюючих обробках.

Дослідження проводили на пері натурних лопаток компресора малорозмірного ГТД зі сплаву ВТ8. Формоутворення пера виконували методом спірального високошвидкісного фрезерування на 5-координатному обробному центрі HERMLE моделі C40U dynamic. Залишкові напруження досліджували методом свердління малих отворів згідно ASTM E837 на установці SINT RESTAN MTS 3000. Для забезпечення необхідного рівня шорсткості аеродинамічних поверхонь лопаток після формуютьорюючих операцій застосовували полірування на круговій віброустановці Roesler R220EC. Деформаційне зміцнення

Технологія виробництва і ремонту

поверхневого шару виконували сталевими кульками в ультразвуковому полі з частотою коливань 17,5 кГц.

В результаті досліджень встановлено, що незалежно від режимів високошвидкісного фрезерування у поверхневому шарі формуються стискаючі залишкові напруження. Максимальна величина напружень спостерігається на глибині 20–40 мкм і залежить від швидкості різання та подачі. Збільшення швидкості різання в діапазоні 63...190 м/хв супроводжується зменшенням величини стискаючих залишкових напружень на 30...35 %.

На основі дисперсійного аналізу результатів активного експерименту встановлено статистично значущий вплив швидкості різання та подачі на величину залишкових напружень. Найбільший вплив має швидкість різання, при цьому вплив швидкості різання та подачі різноспрямований.

Визначено раціональні режими різання:

- для чорнового етапу: швидкість 160–180 м/хв, подача 0,05–0,1 мм/зуб;
- для чистового етапу: швидкість 100–120 м/хв, подача 0,15–0,2 мм/зуб.

Віброполірування протягом 5 год дозволяє повністю видалити регулярний мікрорельєф (строчки) від попереднього фрезерування та забезпечує шорсткість поверхні Ra 0,18–0,36 мкм.

Ультразвукове зміцнення протягом 15 хв формує максимальні стискаючі напруження -515...-520 МПа на глибині 18–20 мкм при загальній глибині залягання 130–135 мкм. Збільшення часу зміцнення більше 15 хв супроводжується перенаклепом поверхневого шару та його руйнуванням.

Дослідження мікротвердості поверхні пера лопаток після фрезерування показали, що незалежно від режимів обробки, в дослідженому діапазоні, вона становила 24...32 %.

Таким чином встановлено основні закономірності зміни залишкових напружень, ступеня та глибини наклепу, а також шорсткості поверхні лопаток компресора при різних видах механічної обробки. Визначено раціональні режими основних операцій технологічного процесу. Показано, що запропонована технологія забезпечує формування якісного поверхневого шару лопаток компресора.

Результати досліджень можуть бути використані при розробці технологічних процесів виготовлення лопаток компресора ГТД з порошкових титанових сплавів. Перспективою подальших досліджень є вивчення зміни хімічного складу поверхневих шарів титанових сплавів типу BT8 у субмікрокристалічному стані при пластичному деформуванні.

УДК 338:658.5

Комісаров О. О.
аспірант, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Дядя С. І.
канд. техн. наук, доцент, НУ «Запорізька політехніка»
м. Запоріжжя, Україна

ВИКОРИСТАННЯ НОВІТНІХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА У АВІАЦІЙНІЙ ГАЛУЗІ

В наш час новітні технології виготовлення деталей, такі як адитивні, знаходять широке впровадження в усіх галузях, пов'язаних з виробничими процесами. Не є виключенням і авіаційна промисловість, бо саме в ній вимоги до ваги та міцності деталей і вузлів є взаємопов'язаними, і можуть бути реалізовані саме адитивними технологіями. Вони дозволяють впроваджувати гнучке виробництво, швидко переходити на випуск нової продукції з ощадливим використанням ресурсів і виготовляти складнопрофільні деталі. В наш час це є актуальним, особливо для виготовлення безпілотних літальних апаратів широкої номенклатури.

Серед адитивних технологій широкого впровадження здобули методи FDM (fused deposition modeling), SLA/DLP/LCD (або фотополімерний друк), SLS (Selective Laser Sintering), SLM (Selective laser melting).

Технологія FDM створює тривимірні об'єкти 3 D - друком шляхом нанесення послідовних шарів матеріалу, що повторюють контури цифрової моделі. Для підвищення точності деталей після виготовлення методом FDM використовують наступне фрезерування або фінішну доробку.

Принцип роботи SLS та SLM методів полягає у точковому спіканні пластикових порошків із різними компонентами або металів лазерним променем. Ці методи дозволяють створювати точні деталі, які неможливо зробити іншими методами, з міцністю, наближеної до субтрактивних методів виробництва. Для цього компанією Autodesk створено програмний продукт «generative design», який дозволяє оптимізувати деталь максимально наближеною до вимог її експлуатації.

Використання методів швидкого прототипування в авіаційній галузі дозволяє автоматизувати процес виготовлення серійних виробів.

УДК 621.771

Товстюченко В. В.
аспірант НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Матюхін А. Ю.
канд. техн. наук, доцент, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

ВДОСКОНАЛЕННЯ РЕМОНТУ ГОЛОВНОГО ВЕРТОЛІТНОГО РЕДУКТОРА ВР-8А

Головний вертолiтний редуктор – це складний механiзм, який передає потужнiсть вiд двигунiв до несучого гвинта, забезпечуючи тим самим пiдйомну силу та керованiсть вертольота. Вiн знижує швидкiсть обертання, яку виробляє двигун, до рiвня, що пiдходить для оптимальної роботи несучого гвинта. Основнi функцiї головного редуктора:

Передача потужностi вiд двигуна до несучого гвинта, що дозволяє вертольоту пiдйматися та маневрувати.

Регулювання швидкостi обертання, оскiльки двигуни вертольотiв зазвичай працюють на високих обертах, тодi як несучий гвинт потребує набагато нижчої частоти обертання.

Розподiл потужностi: частина потужностi може направлятися на iншi системи, як-от рульовий гвинт чи електричнi генератори.

Поява зазорiв i люфтiв у головному вертолiтному редукторi є серйозною проблемою, яка може вплинути на роботу всiєї системи й безпеку польоту. Зазори та люфти можуть виникати з рiзних причин, серед яких:

Зношення шестерень та пiдшипникiв: З часом деталi редуктора пiддаються значним механiчним навантаженням, що призводить до поступового зношення. Це може призвести до утворення зазорiв мiж зубцями шестерень або до люфтiв у пiдшипниках.

Термальнi деформацiї: Пiд час роботи редуктор зазнає високих температур, що може призвести до розширення або деформацiї деталей. Це, в свою чергу, може впливати на точнiсть зчеплення шестерень i викликати зазори.

Неправильне змащення: Недостатня або нерiвномiрна подача мастила може спричинити швидке зношення компонентiв i пiдвищене тертя, що прискорює появу люфтiв та зазорiв.

Технологія виробництва і ремонту

Механічні навантаження та вібрації: Під час роботи вертолiтний редуктор відчуває значні механічні навантаження та вібрації, особливо при зміні швидкості або різких маневрах. Це може призвести до послабленн я з'єднань і появи люфтів.

Методи усунення зазорів та люфтів:

Налаштування підшипників: У разі наявності люфтів у підшипниках можна відрегулювати їх посадку, замінивши або підтягнувши регулювальні кільця та шайби, щоб зменшити зазори. Це найпростіший метод усунення невеликих люфтів.

Заміна підшипників: Якщо знос значний, підшипники замінюють на нові, які забезпечують необхідний рівень жорсткості та точності.

Заміна стакану підшипника, якщо знос значний

Для підвищення ефективності ремонту пропонуються наступні конструктивні рішення:

- **Мірне хромування:** Нанесення шару хрому на зношені поверхні, такі як обойми підшипників або зубчасті колеса, дозволяє відновити їх початкові розміри та усунути зазори. Після хромування поверхні обробляються до точних допусків.

- **Наплавлення з подальшою механічною обробкою:** У випадку значного зносу поверхні можуть відновлювати шляхом наплавлення матеріалу (наприклад, з використанням зносостійких сплавів), а потім обробляти їх до необхідних розмірів.

УДК 621.01.357; 669.268.83

Шовкопляс М. В.
аспірант, Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

Роп'як Л. Я.
д-р техн. наук, професор, Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ХРОМОВИХ ПОКРИТТІВ

Для підвищення зносостійкості та корозивної тривкості деталей машин і механізмів перспективним є застосування покриттів, які забезпечують раціональне поєднання властивостей основи та покриття. За частотою нанесення на робочі поверхні деталей, найбільш часто використовують хромові покриття для підвищення їх експлуатаційних властивостей. Хромові покриття наносять електрохімічним методом і вони широко використовуються під час виготовлення нових і реставрації зношених деталей зі сталі. Результати досліджень [1] свідчать про високі захисні властивості хромових покриттів нанесених електрохімічним методом.

Оскільки у складі традиційних електролітів для хромування містяться сполуки шестивалентного хрому, який є сильним токсикантом, тому інтенсивно ведуться науково-дослідні роботи, спрямовані на розроблення електролітів на основі сполук тривалентного хрому. Тривалентний хром нетоксичний, нешкідливий і не є сильним окислювачем [2].

Хромовані деталі використовують для роботи в рухомих спраженнях у парі з ущільненнями (зворотньо-поступовий рух, обертовий рух), наприклад, плунжерні, поршневі, відцентрові насоси, гідроциліндри тощо. Для покращення експлуатаційних властивостей хромових покриттів проводять їх алмазне вигладжування [3].

Для проведення порівняльних досліджень трибологічних властивостей хромових покриттів, нанесених на сталь 40ХН у проточному електроліті, використали стандартний електроліт Cr(VI) та розроблений Cr(III).

Технологічний процес нанесення хромових покриттів на сталь містив такі основні операції: знежирення ацетоном, шліфування,

Технологія виробництва і ремонту

промивання у воді, електрохімічна активація для видалення окислів, електрохімічне хромування, промивання у воді, алмазне вигладжування, контроль якості покриття.

Таблиця – Результати випробовування хромових покриттів на зношування у парі із гумовим ущільненням

Показник	Коефіцієнт тертя	Знос, мг
Сталь 40XH	0,070	–
Хромове покриття Cr(VI)	0,050	7,0
Хромове покриття Cr(III)	0,040	6,0
Хромове покриття Cr(III) та алмазне вигладжування	0,037	5,9

Аналіз результатів досліджень, наведених у Таблиці, свідчить, що хромове покриття має нижчий коефіцієнт тертя у парі із гумовим ущільненням порівняно зі сталлю 40XH. Хромове покриття, нанесене із розробленого електроліту Cr(III), має кращі трибологічні властивості ніж покриття одержане із стандартного електроліту Cr(VI), що узгоджується із результатами досліджень, представлених у праці [4]. Встановлено, що алмазне вигладжування хромового покриття нанесеного із електроліту Cr(III) сприяє зниженню коефіцієнта тертя та величини зносу за рахунок зниження шорсткості поверхні.

Слід зазначити, що для покращення фізико-механічних властивостей хромових покриттів дослідники пропонують використовувати введення армуючих частинок оксидів [5] або карбідів [6] у склад вказаних хромових покриттів.

Фінансування. Дослідження виконано за кошти Міністерства освіти і науки України, проєкт № 0124U000668.

Список літератури

1. Comparison to Micro Wear Mechanism of PVD Chromium Coatings and Electroplated Hard Chromium. / Yang Z., Zhang N., Li H. et al. // Materials, 2023. – Vol. 16. – No 7. – 2695 p. <https://doi.org/10.3390/ma16072695>
2. A Comprehensive Review of the Current Progress of Chromium Removal Methods from Aqueous Solution / Islam M. M., Mohana A. A., Rahman, M. A. et al. // Toxics, 2023. – Vol. 11. – No 3. – 252 p. <https://doi.org/10.3390/toxics11030252>

3. Stressed State of Chrome Parts During Diamond Burnishing. Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. 2023 / Bembenek, M., Kopei, V., Ropyak, L.Y. et al. // Tekhnologii, 2023. – Vol. 45. – No 2. – P. 239–250. <https://doi.org/10.15407/mfint.45.02.0239>. Guillon R., Dalverny O., Fori B.
4. Mechanical Behaviour of Hard Chromium Deposited from a Trivalent Chromium Bath. Coatings. 2022 / .Guillon R., Dalverny O., Fori B. // Coatings, 2022. – Vol. 12. – No 3. – 354 p. <https://doi.org/10.3390/coatings12030354>
5. Characterization of Cr-ZrO₂ composite coatings electrodeposited from Cr(III) bath / Bikulčius G., Češūnienė A., Selskienė A. et al. // Chemija, 2018. – Vol. 29. – No 2. – P. 97–108. <https://doi.org/10.6001/chemija.v29i2.3712>
6. The Enhancement Effect of Salt Bath Chromizing for P20 Steel / Wei Z., Zhu C., Zhou L. et al. // Coatings, 2021. – Vol. 11. – No 1. 27. <https://doi.org/10.3390/coatings11010027>

УДК 621.924 : 62-253.51

Гребенніков М. О.
аспірант, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Гончар Н. В.
канд. техн. наук, доцент, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ СУХОГО ЕЛЕКТРОПОЛІРУВАННЯ ПІД ЧАС ВИГОТОВЛЕННЯ РОТОРНИХ ЛОПАТОК

Чим екстремальніші умови експлуатації лопаток газотурбінних двигунів у середовищі високих температур і тисків, тим питання підвищення шорсткості поверхні профілю стає більш актуальним. Це особливо актуально для лопаток турбін і лопаток останніх ступенів компресора ГТД.

Шорсткість поверхні лопаток роторних машин є важливим показником якості виготовлення лопатки. Вона впливає на такі характеристики двигуна як шум і вібрація, дає змогу підвищити ККД і термін служби.

Сухе електрополірування за технологією DryLyte доволі швидко розповсюджується у виробництві деталей з підвищеними вимогами до точності та якості поверхневого шару. Застосування цієї технології у виробництві лопаток авіаційних двигунів викликає практичний інтерес як альтернативний метод тонкому ручному поліруванню.

Для попереднього порівняння та оцінки, на обробку методом сухого електрополірування були направлені лопатки компресора після фрезерування, ручного полірування, і лопатки турбіни після нанесення на профіль жаростійкого покриття. На рисунках 1–3 представлено зовнішній вигляд пера лопатки перед (а) і після (б) обробки методом сухого електрополірування.



Рисунок 1 – Обробка лопатки компресора після фрезерування

Технологія виробництва і ремонту

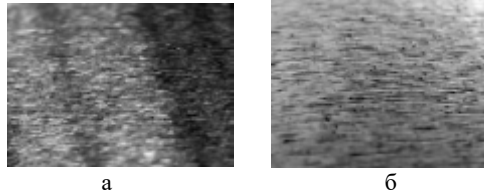


Рисунок 2 – Обробка лопатки компресора після ручного полірування

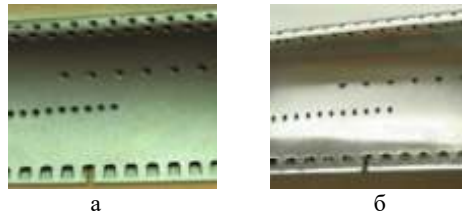


Рисунок 3 – Обробка лопатки турбіни після нанесення жаростійкого покриття

Загальний час сухого електрополірування становив 195 хв за два переходи. Після фрезерування ($Ra1,1$) на профілі пера лопатки вдалося досягти параметр шорсткості $Ra0,35$, що задовольняє вимогу якості готових лопаток. Але через те, що видалення з поверхні лопатки шару металу здійснювали гранулами електроліту, меншими за величину хвилястості пера, то через технологічну спадковість хвилястість стає меншою, але зберігається.

Параметр шорсткості, досягнутий на профілі лопатки після ручного оброблення, перебуває в межах від $Ra0,5$ до $Ra1,2$. Сліди від абразивного інструменту також зменшуються, але є наявними.

Позитивним можна вважати тільки результат, отриманий після сухого електрополірування лопаток турбіни протягом 75 хвилин. На поверхні покриття були отримані значення шорсткості $Ra0,3$.

Попередні результати свідчать, що технологія DryLyte фінішної обробки на запропонованих режимах, є раціональною на деталях із попередньо обробленими поверхнями, наприклад, віброполіруванням, для того щоб видалити грубі сліди попередніх операцій; є можливим використання комплексної фінішної обробки.

Необхідно провести подальші дослідження методу сухого електрополірування, визначити раціональні режими (розмір наповнювача, електроліт для насичення, сила струму, амплітуда вібрації, тривалість обробки тощо) стосовно таких деталей як лопатки ГТД.

УДК 621.3.035.183

Гайдзік Божена
д-р техн. наук, професор, Сілезький технологічний
університет, м. Глівіце, Польща

Роп'як Л. Я.
д-р техн. наук, професор, Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, Україна

Винар Т. В.
аспірант, Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, Україна

ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В НАВОДНЮЮЧИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Використання традиційних сталей для виготовлення обладнання, яке експлуатується під час буріння і розробки нафтових і газових родовищ з високим вмістом у продукції сірководню, зберігання та транспортування енергоносіїв, не є ефективним, оскільки в відбувається сульфідне розтріскування загартованих сталей внаслідок дії механічних навантажень та процесів наводнення, а також й зношування за підвищених температур.

У сучасному машинобудуванні використовують широкий спектр металевих, неметалевих та композиційних матеріалів і технологій зміцнення для підвищення роботоздатності деталей машин за умов дії трибокорозії. Серед них найбільш часто використовують: модифікацію робочих середовищ; інгібітори корозії; раціональний підбір матеріалів для елементів контактуючих пар; легування; нанесення металевих, оксидних, композиційних покриттів тощо. Проведений аналіз сучасних технологічних методів захисту сталі від сульфідного розтріскування показав перспективність застосування покриттів, які забезпечують раціональне поєднання властивостей матеріалу основи та покриття.

Алюмінієві сплави характеризуються високою питомою міцністю та корозивною тривкістю в наводнюючих середовищах, проте мають низьку зносостійкість, що стримує їх широке застосування для виготовлення деталей машин. Одним з перспективних методів значного підвищення зносостійкості легких сплавів є формування на їх поверхні зносостійкого оксидного шару

Технологія виробництва і ремонту

плазмовим електролітичним оксидуванням [1–3]. Дослідження у даному напрямі є актуальними і проводяться багатьма вітчизняними (UA) та зарубіжними дослідниками (US, DE, FR, PL, LT, JP, CN). В Україні такі дослідження проводяться в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут», Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу, Луцькому національному технічному університеті, Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України та інших.

Оксидні шари утворюються тільки на металах вентильної групи [1–3]. Для формування оксидних шарів на інших матеріалах дослідниками пропонується поєднати технології попереднього нанесення шару алюмінію різними методами з подальшим плазмовим електролітичним оксидуванням зовнішньої частини напиленого шару алюмінію [4, 5]. Для нанесення шару алюмінію використовують різні методи напилення (газополумєнове, холодне високочастотне, детонаційне, електродугове, плазмове, високочастотне), плакування, алітування тощо. У результаті поєднання різних за властивістю матеріалів та керуючи технологічними режимами формування покриття можна отримати комбіноване двошарове покриття $Al-Al_2O_3$ із широким спектром фізико-механічних властивостей. Однією з переваг даного підходу є забезпечення зносостійкості поверхні зміцненої деталі оксидним шаром, сформованим плазмовим електролітичним оксидуванням, а наявність проміжного шару з алюмінію чи алюмінієвого сплаву слугуватиме бар'єром для проникнення водню в основу металу цієї деталі, виготовленої зі сталі.

У подальших дослідженнях планується встановити закономірності формування на загартованій вуглецевій сталі двошарових покриттів: вентильний метал (алюміній) – оксид алюмінію та встановлення механізму їх захисної дії під час зношування в корозійних сірководневих середовищах із вмістом абразивних частинок.

Фінансування. Дослідження виконано за кошти Національного фонду досліджень України (National Research Foundation of Ukraine) за проектом НФДУ № 2023.04/0160, 0124U003748 «Розробка технології формування жаростійких покриттів плазмовим електролітичним оксидуванням на деталях авіаційної та ракетно-космічної техніки» (конкурс «Наука для зміцнення обороноздатності України»).

Список літератури

1. Electrolytic Oxidation (PEO) Process-Processing, Properties, and Applications / Sikdar S., Menezes P. V, Maccione R. Et al. // *Nanomaterials*, 2021. – Vol. 11. – No. 6. art. no. 1375. <https://doi.org/10.3390/nano11061375>
2. Introduction to Plasma Electrolytic Oxidation-An Overview of the Process and Applications / Simchen F., Sieber M., Kopp A., Lampke T. // *Coatings*, 2020. – Vol. 10. – No. 7. art. no. 628. <https://doi.org/10.3390/coatings10070628>
4. Clyne T. W. A review of recent work on discharge characteristics during plasma electrolytic oxidation of various metals / Clyne T. W., Troughton S. C. // *International Materials Reviews*, 2019. – Vol. 64. – No. 3. – P. 127–162. <https://doi.org/10.1080/09506608.2018.1466492>
5. Design of a Two-Layer Al-Al₂O₃ Coating with an Oxide Layer Formed by the Plasma Electrolytic Oxidation of Al for the Corrosion and Wear Protections of Steel / . Ropyak L., Shihab T., Velychkovych A. Et al. // *Progress in Physics of Metals*, 2023. – Vol. 24. – No. 2. P. 319–365. <https://doi.org/10.15407/ufm.24.02.319>УДК 662.758.2

Прунько І. Б.

канд. техн. наук, доцент, Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, Україна

Курилів Ю. О.

студент, Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

ВИПРОБУВАННЯ СТАЛЬНИХ ЗРАЗКІВ НА ЗНОС ПРИ ЇХ ВЗАЄМОДІЇ З АБРАЗИВНИМИ ЗЕРНАМИ, ПРУЖНОЗАКРІПЛЕНИМИ В ЕЛАСТИЧНОМУ КОНТРТЛІ

Для дослідження зносостійкості поверхонь штоків насосу під ущільнення пропонується використовувати універсальну машину тертя моделі 2168 УМТ – 1 [1], яка дає можливість моделювати процеси зносу пари тертя «шток – ущільнення».

Вибрана схема випробовувань при зоротно-поступальному русі реалізується шляхом встановлення додаткового пристрою – камери, яка іде в комплектації машини (рис. 1).

Досліджувана пара тертя «стержень-палець» має свої конструктивні конструкційні особливості. Ескізи досліджуваних зразків подані на рис. 1.

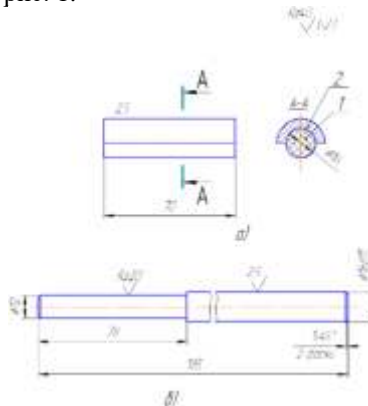


Рисунок 1 – Ескізи зразків для випробовувань:

a – палець; *б* – стержень

Рухомий зразок – стержень (рис. 3а) виготовляється із матеріалу сталь 40Х. Зразок палець (рис. 3б) виготовлений з гуми

ИРП – 1124. Оригінальним в цьому зразку є те, що в процесі виготовлення до невулканізованої (сирої) гуми додається сипучий абразивний матеріал – кварцовий пісок, фракції не більше 0,6 мм. Все ретельно перемішується і тільки після цього з отриманої маси формується сам зразок, який піддається вулканізації. З метою рівномірного розподілу зусилля по всій довжині гумового зразка, а також його фіксації останній встановлюється в зразкотримач у вигляді направляючої 2 у формі урізаної втулки. Зразкотримач дозволяє періодично переміщувати гумовий зразок в осьовому напрямку і встановлювати контакт металевого зразка з незношеною ділянкою гумового пальця. Така система дозволить найбільш точно відтворити процес зношування поверхні штока насоса високого тиску при контакті його з гумовим ущільненням, у поверхню якого проникли зерна абразиву.

Картина зношування сирого зразка, виготовленого зі сталі 40Х при контакті з насиченим абразивом гумовим зразком нагадує процес зношування м'яких матеріалів в середовищі слабо закріпленого абразиву (метод Веллінгера-Уетца) [2]. Спочатку спостерігається різка інтенсивність зношування. Це пояснюється тим, що гумове контртіло припрацьовується із дослідним металічним зразком. Структура поверхні зразка є неоднорідною і нерівномірною, тобто поверхня має мікронерівності (шорсткість), яка характеризується виступами. Під час зворотного-поступального руху ці виступи стираються, відбувається притирка. Тому маса металу різко знижується. Подальше проведення дослідів приводить до того, що маса металу зменшується більш поступово. Має місце також так званий «від'ємний знос» - зростання маси зразка в процесі тертя. Має місце явище насичення поверхні металевого зразка абразивом (шаржування). Як показують наші досліді процес шаржування і зношування постійно перебувають в стані нівелювання один одного.

Список літератури

1. Богатчук І. М. Вивчення зносу штоків гідравлічних насосів агрегатних установок нафтогазового технологічного транспорту / Богатчук І. М., Прунько І. Б., Богатчук Ю. М. // Проблеми трибології. – 2007. – № 4(34). – С.67–75.
2. Пат. на корисну модель № 34522 Україна, МПК (2006) G01N 3/56. Спосіб випробування матеріалів на знос / Я. М. Дрогомирецький, І. М. Богатчук, І. Б. Прунько, Ю. І. Богатчук. – u200804166; Заявлено 02.04.2008; Опубліковано 11.08.2008, Бюл. № 15. – 3 с.

УДК 621.791.92.04

Присяжнюк П. М.

д-р техн. наук, доцент, Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, Україна

Махнік Ришард

д-р техн. наук, професор, Університет науки і технологій AGH
Станіслава Сташича, м. Краків, Польща

Бембенек Міхал

д-р техн. наук, професор, Університет науки і технологій AGH
Станіслава Сташича, Краків, Польща

Тирлич М. В.

аспірант, Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

ШЛЯХИ УДОСКОНАЛЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ ЗА УМОВ УДАРНО-АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ

Необхідність інтенсифікації робіт із відбудови інфраструктури України у воєнний та повоєнний періоди вимагає застосування широкого спектру обладнання, яке експлуатується за складних умов, пов'язаних із одночасною дією динамічних навантажень та впливу абразивного середовища. Традиційні методи визначення механічних властивостей, наприклад визначення мікро- та макротвердості, склерометрії і т.п. не є придатними для оцінки роботоздатності деталей за таких умов. Тому виникає необхідність у розробленні нових засобів та методик, які б імітували знос реальних поверхневих шарів за умов ударно-абразивного зношування для широкого спектру матеріалів за різних навантажень та у середовищах різного ступеня абразивності. Це є важливим для прогнозування надійності низки обладнання в авіаційній, нафтогазовій, гірничій, будівельній, переробній та інших галузях. Відомі методики оцінки рівня ударно-абразивного зносу, зокрема описані у праці [1] характеризуються досить суттєвим недоліком, який полягає у динамічній зміні абразивної здатності частинок у процесі випробувань [2]. Це впливає на кінетику процесу зношування та викликає необхідність проводити аналіз морфології частинок абразиву на різних стадіях триботехнічних тестів, тому виникає потреба в їх удосконаленні.

Список літератури

1. Prisyazhnyuk P. Impact and abrasion wear resistance of the hardfacings based on high-manganese steel reinforced with multicomponent carbides of Ti-Nb-Mo-V-C system [Electronic resource] / P. Prisyazhnyuk, O. Ivanov, O. Matvienkiv, S. Marynenko, I. Koval // Procedia Structural Integrity. – 2022. – Vol. 36. – P. 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.01>
2. Lutsak D. Development of a method and an apparatus for tribotechnical tests of materials under loose abrasive friction [Electronic resource] / D. Lutsak, P. Prisyazhnyuk, M. Burda, V. Aulin // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 5. – No. 7(83). – P. 19–26. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79913>

УДК 621

Manzhos V. G.

St. gr. A-134.12, Zaporizhzhia Polytechnic University, Zaporzhzhia,
Ukraine

Ivasishin O. M.

Academician of National, Dr. Tech. Sciences, G.V. Kurdyumov Institute
for Metal Physics, Kyiv, Ukraine

Savakin D. G.

Dr. Phys. And Mathem Sciences, G.V. Kurdyumov Institute for Metal
Physics, Kyiv, Ukraine

Torba Uy. I.

Ph. D. technical Science, Zaporizhzhia Polytechnic University,
Zaporizhzhia, Ukraine

INCONEL 718 ALLOY PRODUCTS MANUFACTURED USING METAL INJECTION MOLDING APPROACH

The cost-effective manufacturing of nickel-based parts for high-temperature zones of aviation gas turbine engines is practically important task. Present study was dedicated to development of manufacturing approach for gas turbine blades from Inconel-718 alloy (52.50 Ni–18.50 Fe–19.00 Cr–5.10 Nb–3.00 Mo–0.50 Al–1.01 Ti–0.08 C, wt.%) using powder metal injection molding (MIM). The noted net-shape approach is promising for mass production and provides a significant cost reduction compared to conventional manufacturing technologies (casting, hot deformation, machining). However, the important task is achievement of desirable characteristics of MIM produced material itself and products of it, which requires the adaptation of MIM technology for Inconel 718 aviation parts.

The manufacturing route included blending of Inconel 718 powder with organic binder, forming of net-shape compacts, binder removal stage, sintering of powder compacts in vacuum or under argon atmosphere and final heat treatment. Proper selection of technological parameters and conditions for powder forming, sintering and heat treatment ensures manufacturing finished products with the desired phase composition and microstructure, and, hence, physical and mechanical properties. Scanning electron microscopy, X-ray analysis, hardness and tensile tests were used to characterize the microstructure, phase composition and mechanical characteristics of final product. Optimization of processing conditions ensured achievement of sufficient

characteristics, namely, tensile strength of 900 MPa, elongation 16 % and hardness of 372 HV of Inconel 718 blades. Implementation of MIM technology is intended in Ukrainian aviation industry for manufacturing high-temperature nickel-based aviation products with improved cost-efficiency.

References

1. Material Science & Engineering A 689 (2017), “Microstructure and hardness of Inconel 718 manufactured by selective laser melting before and after solution heat treatment”, P. 220–232.
2. Materials and Design 52 (2013), “Microstructural characteristic of forged and heat treated Inconel 718 discs”. P. 791–800.

УДК 629.03

Обдул В. Д.

канд. техн. наук, доцент, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Широкобокова Н. В.

канд. техн. наук, доцент, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Фокін С. М.

аспірант гр. А-131.13 НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ВІДПОВІДАЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ ВЕРТОЛІТНИХ РЕДУКТОРІВ З КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

Найпоширенішими у світі є вертольоти одногвинтової схеми з рульовим гвинтом. На даному типі вертольотів зазвичай встановлюється три редуктора – це головний вертолiтний редуктор, проміжний і хвостовий редуктор (деякі вертольоти іноземного виробництва можуть бути з двома редукторами, головним і хвостовим). Вертолiтні редуктора представляють собою самостійні агрегати і використовуються для спільної роботи з одним або двома авіаційними двигунами і таким чином складають єдину силову установку. Головний вертолiтний редуктор складаються з скріплених між собою корпусів, всередині яких розміщується основний, найвідповідальніший вузол механізму редуктора з планетарним ступенем. Планетарний ступінь складається з набору циліндричних та конічних шестерень. Хвостовий і проміжний редуктор складається з пари конічних зубчастих шестерень. В даних редукторах шестерні виготовляються з високоякісних легованих хромонікелевих сталей конструкційного типу 12Х2Н4А-Ш, 18Х2Н4ВА-Ш.

Під час аналізу принципу та умов роботи редукторів більш детально було розглянуто проміжний редуктор вертольоту та його характеристики і режими роботи. Проміжний редуктор призначений для зміни напрямлення осі хвостового валу трансмісії на кут 45° відповідно з напрямленням кінцевої балки. Зміна напрямлення осі хвостового валу досягається застосуванням в редукторі пари конічних зубчастих коліс з однаковою кількістю зубів, без зміни частоти обертання ведучого і веденого валів редуктора. Номінальна

Технологія виробництва і ремонту

частота обертання шестерень складає – 2589 об/хв. Змащення деталей, що труться в редукторі здійснюється методом розбризкування. Ведуче зубчасте колесо частково занурено в мастило, при обертанні створює в картері масляний туман, тим сам забезпечуючи достатнє змащення зубчатих коліс і передніх підшипників. Максимально допустима температура мастила в редукторі 110 °С.

Знаючи характеристики і режими роботи шестерень проміжного редуктора можна розглядати варіанти виготовлення їх з композитних матеріалів. А також переваги і недоліки даних матеріалів та технології виготовлення шестерень проміжного редуктора з композитних матеріалів.

В машинобудуванні використання шестерень з композиційних матеріалів мають широке застосування та мають певні напрацювання в цьому напрямку. Що не скажеш про авіабудування. Поки що дана технологія виготовлення шестерень з композиційних матеріалів мало вивчена та має малий спектр застосування. Але використання сучасних композитних матеріалів, дозволить використати нові принципи проектування і виготовлення шестерень. Сучасні композити мають не тільки широкий спектр фізико-механічних властивостей, але і здатність до направленої їх зміни: міцності, жорсткості, в'язкості. А саме головне в авіації, що дозволить використання композиційних матеріалів – це зменшення шуму та ваги. Адже зменшення ваги дозволить збільшити комерційне навантаження на вертоліт та мати економічний ефект. При цьому не втративши надійності і ресурсні показники вертольоту.

Також на практиці є методи виготовлення зубчатих коліс шляхом комбінування металевих матеріалів з композитами та виготовлення шестерень порошковим пресуванням.

Проводячи аналіз публікацій по цій темі показує велику актуальність даної теми виготовлення шестерень з композиційних матеріалів. Сучасною тенденцією являється комбінування матеріалів і технологій виготовлення шестерень, щоб отримати міцні, легкі і з великим ресурсом використання вироби.

УДК 621.762.02:669.295

Джуган О. А.
старш. викл., НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Кирилаха С. В.
аспірантка, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ НЕСФЕРИЧНИХ ТИТАНОВИХ ПОРОШКІВ ДЛЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Застосування адитивних технологій є перспективним напрямком у розвитку різних галузей промисловості (особливо таких як високоточне машинобудування та авіадвигунобудування), що дає змогу одержувати готові вироби, а також виготовляти необхідне в промисловості технологічно складне оснащення. Найважливішим завданням при цьому є заміна наявних дорогих імпорتنих порошкових матеріалів дешевшими аналогами.

Метою досліджень є оцінка можливості використання титанових порошків, які попередньо піддавали операціям гідрування та дегідрування в технологічному ланцюжку їх виробництва для подальшого отримання виробів різними методами адитивних технологій.

Методом профілювання насипаних і закріплених із підкладкою порошкових шарів мінімальної товщини із застосуванням різних фракцій показано, що оптимальна зовнішня поверхня отримується за умови використання порошкового матеріалу, в якому частинки мають форму багатогранників, умовно прийнятих за об'єкти, які за формою наближаються до частинок, у вигляді гексаєдрів та їхніх різновидів. Використання таких порошків має забезпечити більш щільну та однорідну структуру у порівнянні з порошками сферичної форми [1–4].

На наведеній (рис. 1) мікрофотографії багатошарового зразка з нелегованого титану (отриманого сплавленням за технологією електронно-променевого сплавлення) показано досить хороший рівень адгезії шарів без будь-яких видимих дефектів, типу несучільностей (раковин або непроплавів).

Розглянуто можливість застосування різних джерел енергії та способів для пошарового нарощування матеріалу при формуванні виробів – автоматичне електронно-променеве наплавлення та ручне аргонодугове наплавлення. Визначено оптимальні режими процесів крокового сплавлення тонких шарів порошкових матеріалів.

Матеріали авіаційного виробництва



Рисунок 1 – Мікроструктура дослідних зразків отриманих за технологією пошарового нарощування з титанового порошку (фракція -250+100 мкм):

а – метод електронно-променевого наплавлення; б, в – метод аргондугового наплавлення

Проведено металографічні дослідження зразків, отриманих з несферичних порошоків, що показало високий рівень адгезії шарів без видимих несучільностей.

Список літератури

1. Овчинников А. В. Моделирование процесса 3-d печати с использованием несферических гидрированных-дегидрированных порошков титана / А. В. Овчинников, А. А. Джуган, А. В. Шевченко, [и др.] // Стародубовские чтения. Сборник трудов. – 2015. – С. 222–228.
2. Овчинников А. В. Применение несферических гидрированных и дегидрированных порошков титана для получения изделий в аддитивных технологиях / А. В. Овчинников, В. Е. Ольшанецкий, А. А. Джуган // Вестник двигателестроения. – 2015. – № 1. – С. 114–117.
3. Уплотняемость порошковых материалов с различной формой частиц / В.Е. Ольшанецкий, А.В. Овчинников, А.А. Джуган [и др.] // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2015. – № 1. – С. 130–133.
4. Джуган О. А. Применение титановых порошков с несферической формой частиц при изготовлении изделий методами 3d печати / О. А. Джуган, В. Ю. Ольшанецкий // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2019. – №1. – С. 52–55.

УДК 669.295:669.046.516

Галенкова О. Б.
аспірант УДУНТ, інженер ДП «Івченко-Прогрес»,
м. Запоріжжя, Україна

Куц Д. О.
АТ «Мотор Січ», м. Запоріжжя, Україна

Урекін Д. В.
аспірант УДУНТ, м. Дніпро, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ СПЛАВУ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІДУ ТИТАНУ ШЛЯХОМ МОДИФІКУВАННЯ

Сплави на основі алюмінідів титану, або γ -сплави, є одними з найбільш перспективних матеріалів для отримання лопаток газотурбінних двигунів нового покоління. Порівняно з іншими конструкційними матеріалами, що використовуються в авіаційному секторі промисловості, найбільш важливими перевагами сплавів на основі алюмінідів, є низька щільність, висока питома міцність та модуль пружності, висока структурна стабільність.

Головною формуювальною технологією виробництва деталей з алюмініду титану є технологія лиття [1–5], що уявляє собою найбільш економічний виробничий процес для отримання виробів складної форми. Отримана мікроструктура виробів характеризується крупнозернистою будовою, що поступається за властивостями матеріалам, отриманим, наприклад, шляхом деформації або адитивними технологіями.

Одним із раціональних та практично доцільних шляхів подрібнення зерна литої структури, підвищення технологічної та конструкційної пластичності γ -сплавів з одночасним забезпеченням високих характеристик міцності та жароміцності є модифікування. Головний напрямок модифікування – це введення тугоплавких елементів, що штучно збільшують кількість зародків при кристалізації, та використання поверхнево активних елементів, механізм дії яких полягає у адсорбції на поверхні зерен, що сприяє зміні поверхневої активності кристалів та швидкості дифузії і призводить до зміни форми та розмірів кристалів [6]. Головним критерієм вибору поверхнево активного модифікатора є мала розчинність в ґратці основного металу, тобто титані. Найбільший ефект від модифікування досягається при комплексному введенні модифікуючих елементів.

Метою роботи є дослідження впливу різних концентрацій Y, Re та B на структуру та властивості сплаву на основі алюмініду титану системи Ti-28Al-7Nb-2Mo.

В якості об'єкту дослідження використано злитки алюмініду титану дослідного складу системи Ti-28Al-7Nb-2Mo, легованих мікродобавками ітрію, ренію та бору, отриманих у вакуумно-дугової печі з мідним кристалізатором.

Дослідження проводили у відповідності з методом планування ортогонального повнофакторного експерименту 2³. Для визначення індивідуального впливу модифікаторів їх нижній рівень приймали рівним нулю. Верхній рівень вмісту модифікаторів 0,2% обирали виходячи з фізичних та хімічних особливостей кожного з елементів.

Проведено дослідження впливу модифікаторів на структуру та властивості отриманих злитків. Визначено, що введення ітрію призводить до глобуляризації та фрагментації структурних складових, введення бору сприяє формуванню пластинчастої структури з малим розміром колоній, а додавання ренію значно потоншує пластинки ($\alpha_2 + \gamma$)- фаз. Суттєва зміна морфології структурних складових вихідного сплаву дозволяє підвищити характеристики міцності та пластичності, особливо в значній мірі при комплексному легуванні.

Отримано регресійні рівняння залежності границі міцності та пластичності від вмісту модифікуючого елементу, що мають квадратичний та лінійний вигляд відповідно.

Встановлено оптимальні концентрації модифікуючих елементів у складі дослідного сплаву на рівні 0,1% кожного, що забезпечують найбільш суттєве підвищення механічних властивостей – границя міцності сплаву підвищується з 285МПа до 800МПа, відносне подовження – з 0,4% до 1%.

Список літератури

1. Развитие технологии Электронно-лучевой плавки титана / Патон Б.Е., Тригуб Н. П., Замков В.Н. и др. // Проблемы спецэлектрометаллургии. – 2000. – №2. – С. 34–40.
2. Microstructure development during directional solidification of Ti-45Al-8Nb alloy / . Ding, X.F., Lin, J.P., Zhang, L.Q. et al. // J. Alloys Compd. – 2010, 506, 115–119.
3. ЭШП титана: вчера, сегодня, завтра / Патон Б.Е., Медовар Б.И., Бенц М.Г. и др. // Проблемы спецэлектрометаллургии. – 1999. – №2. – С. 3–7.
4. Возможности дугошлакового переплава как одного из методов специальной электрометаллургии// Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра / Патон Б.Е., Саенко В.Я., Помарин Ю.М. и др. – К. : Політехніка. – 2002. – С. 102–108.
5. Changes of Oxygen Content in Molten TiAl Alloys as a Function of Superheat during Vacuum Induction Melting / Chen, B., Ma, Y., Gao, M., Liu, K. // J. Mater. Sci. Technol. – 2010, 26, P. 900–903.
6. Мальцев М. В. Модифицирования структуры металлов и сплавов / Мальцев М. В. – М. : Металлургиздат, 1964. – 21 с.

УДК 669.583.9

Тесля С. Ю.

доктор філософії, асистент, КПІ ім. Ігоря Сікорського,
м. Київ, Україна

Наконечний С. О.

аспірант, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Троснікова І. Ю.

канд. техн. наук, доцент, КПІ ім. Ігоря Сікорського,
м. Київ, Україна

Юркова О. І.

д-р техн. наук, професор, КПІ ім. Ігоря Сікорського,
м. Київ, Україна

Лобода П. І.

д-р техн. наук, професор, академік НАН України,
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

СИНТЕЗ ВИСОКОЕНТРОПІЙНОГО AlTiFeNiNb СПЛАВУ ТА ЙОГО ТЕРМОСТАБІЛЬНІСТЬ

Високоентропійні сплави (ВЕС) представляють собою новий клас металевих матеріалів із перспективними властивостями для застосування в авіації. Ці сплави, що складаються з чотирьох або більше елементів у майже рівних пропорціях, мають підвищену міцність, зносостійкість, жаростійкість, окисну та корозійну стійкість. Завдяки таким характеристикам ВЕС здатні забезпечити кращу довговічність та надійність компонентів авіадвигунів, лопатей турбін і конструктивних елементів [1]. Не менш важливою вимогою для деталей авіаційної техніки є низька густина, для підвищення ефективності використання палива та розширення корисної підйомної ваги літального апарату. З цією метою для синтезу ВЕС обирають вихідні компоненти з низькою густиною, такі як титан, алюміній [2]. Проте кінцеві сплави досягаються шляхом легування елементами групи заліза чи тугоплавкими металами. Тому в роботі було проведено дослідження процесів отримання порошків високоентропійного AlFeTiNiNb сплаву механічним легуванням вихідних елементарних порошків в планетарному млині протягом 20 годин.

На рисунку 1а показано морфологію частинок високоентропійного AlFeTiNiNb сплаву після механічного

Матеріали авіаційного виробництва

легування. Частинки порошку мають правильну форму за рахунок високої пластичності складових, які «обкатуються» під час розмелювання з утворенням стійкої морфології. Середній розмір частинок складає 2 мкм.

З метою встановлення термічної стабільності порошкового ВЕС було проведено диференціальний скануючий термічний аналіз в інтервалі температур 25–1350 °С. Вимірювання проводили в протоці аргону з використанням керамічних тиглів на основі оксиду алюмінію. Відповідно до отриманих даних (рис. 1б) синтезований сплав AlFeTiNiNb не проявляє теплових ефектів, що вказує на його високу термічну стабільність та можливість використання за підвищених температур експлуатації.

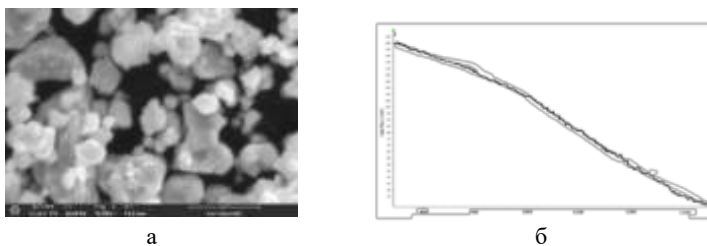


Рисунок 1 – Морфологія (а) та зміна теплового потоку (б) під час нагрівання ВЕС

Робота виконана за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України (проект 2023.03/0053, Договір № 244/0053)

Список літератури

1. Savage N. High-entropy alloys expand their range. Nature. 2021. Т. 595, № 7865. С. S4–S5. URL: <https://doi.org/10.1038/d41586-021-01788-0>.
2. Design and development of low density, high strength ZrNbAlVTi high entropy alloy for high temperature applications / P. Chakraborty та ін. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2023. С. 106222. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2023.106222>

УДК 621.762.5

Наконечний С. О.
аспірант, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Юркова О. І.
д-р техн. наук, професор, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ,
Україна

Лобода П. І.
д-р техн. наук, професор, академік НАН України,
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

ВИСОКОЕНТРОПІЙНИЙ AlCrNiTiB СПЛАВ, САМОАРМОВАННИЙ ЧАСТИНКАМИ ДИБОРИДУ ТИТАНУ

На протязі останнього сторіччя відбувається надзвичайно швидкий розвиток авіації, як цивільної, так і військової. У зв'язку з екстремальними умовами експлуатації, різні деталі авіаційної техніки, наприклад лопатки турбін або системи гальмування, потребують комплекс різноманітних властивостей: легкість, термостабільність, високі механічні властивості, стійкість до корозії, окиснення, зношування [1]. Однак традиційні матеріали (сплави алюмінію, титану, нікелеві суперсплави, оксидна кераміка) мають обмежені характеристики, у зв'язку з чим проводиться пошук та дослідження нових матеріалів [1, 2]. Одними з таких матеріалів є легкі високоентропійні сплави (ВЕС), які поєднують низьку густину, високу термостабільність, механічні властивості та стійкість в екстремальних умовах експлуатації, як за звичайних, так і підвищених температур. Найбільш популярними серед них є ВЕС на основі таких елементів як Al, Cr, Ni, Ti [2], однак певний інтерес також становлять композиційні матеріали з додаванням неметалевих елементів, наприклад бору [3], що підвищує їх механічні властивості, стійкість до корозії, окиснення, зношування тощо.

Метою даної роботи є отримання AlCrNiTiB ВЕС шляхом механічного легування суміші елементарних компонентів протягом 10 год в середовищі бензину з наступним електронно-променевим спіканням.

На рисунку 1 представлено зображення мікроструктури AlCrNiTiB ВЕС після електронно-променевого спікання протягом 1 хв за температури ~ 1200 °C. Мікроструктура сплаву представляє собою композиційний матеріал, що складається з сірої металевої матриці на основі Al, Cr, Ni та Ti, а також дрібнодисперсних темних

Матеріали авіаційного виробництва

включень дибориду титану сфероподібної або багатогранної форми розміром від декількох сотень нм до 1 мкм. В свою чергу металева матриця композиційного матеріалу має шарувату структуру, що складається з сірих шарів із підвищеним вмістом Al та Ti, а також світло-сірих шарів із підвищеним вмістом Cr та Ni. Крім цього, для темних включень дибориду титану спостерігається наявність темно-сірих та чорних частинок, що пов'язано з відхиленням від стехіометрії в процесі росту включень з атомарних Ti та B, що знаходились в вихідному порошку ВЕС.

Твердість спеченого AlCrNiTiB ВЕС становить $9,3 \pm 0,5$ ГПа, а пористість не перевищує 1 %. Висока твердість сплаву забезпечується ефектами твердорозчинного зміцнення твердих розчинів атомами заміщення та проникнення, а також дисперсійного зміцнення за рахунок частинок дибориду титану.

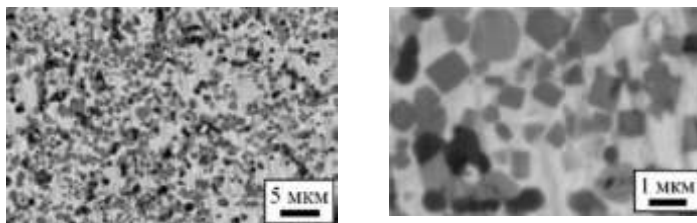


Рисунок 1 – Мікроструктура AlCrNiTiB ВЕС після електронно-променевого спікання протягом 1 хв за температури ~ 1200 °C

Робота виконана за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України (проект 2023.03/0053, Договір № 244/0053)

Список літератури

1. Lone N. F. Present challenges in development of lightweight high entropy alloys: A review / Nadeem Fayaz Lone, Frank Czerwinski, Daolun Chen // *Applied Materials Today*. – 2024. – Vol. 39. – P. 102296.
2. Structures and mechanical properties of Ti-Nb-Cr-V-Ni-Al refractory high entropy alloys / E. S. Panina [et al.] // *Materials Science and Engineering: A*. – 2020. – Vol. 786. – P. 139409.
3. The Effect of Boron Content on the Structure and Mechanical Properties of Electron-Beam High-Entropy AlNiCoFeCrTiB Coatings / S. O. Nakonechnyi [et al.] // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. – 2023.

УДК 544.023:620.178

Швед М. М.
інженер, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН
України, м. Львів, Україна

Подгурська В. Я.
канд. техн. наук, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка
НАН України, м. Львів, Україна

Клименко І. О.
м.н.с, ННЦ Харківський фізико-технічний інститут,
м. Харків, Україна

Купрін О. С.
канд. техн. наук, ННЦ Харківський фізико-технічний інститут,
м. Харків, Україна

Голтвяниця В. С.
канд. техн. наук, доцент, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ TiN і CrN ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

Титанові сплави широко використовуються в аерокосмічній промисловості завдяки поєднання їх низької густини, високих корозійної стійкості та міцності, проте трибологічні властивості особливо при високих температурах, потребують підвищення. Одним із способів підвищення зносостійкості є осадження захисних покриттів. Метою роботи було розроблення та дослідження покриття на основі нітридів титану та хрому, що забезпечує зносостійкість сплаву ВТ6 при температурах від 20 до 500°C.

Зразки з титанового сплаву ВТ6 (Ti-6Al-4V), розміром 3x20x36 мм, азотували в плазмі азоту, а після цього наносили методом вакуумно-дугового осадження покриття: CrN, TiN та багатошарове TiN/CrN (Табл.). Товщина всіх покриттів складала 10-12 мкм, а товщина кожного шару в багатошаровому покритті була ~ 100нм. Дослідження на зносостійкість проводили на трибометрі зі зворотньо-поступальною схемою випробування, за нормального навантаження 2Н, у парі з керамічною (Al₂O₃) кулькою при температурах 20°C і 500°C.

Встановлено, що азотування поверхні титанового сплаву ВТ6 незначно впливає на значення коефіцієнта тертя порівняно з вихідним

Матеріали авіаційного виробництва

станом, проте суттєво знижує питому швидкість зношування покриття $8,58 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ проти $9,06 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ при температурі випробування 20°C та $6,66 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ проти $1,74 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ при температурі випробування 500°C . Для покриття на основі нітриду хрому коефіцієнт тертя при 500°C підвищується, при цьому питома швидкість зношування покриття знижується як при кімнатній температурі, так і при 500°C . При дослідженні трибологічних властивостей покриття на основі нітриду титану було встановлено, що за високого коефіцієнта тертя його питома швидкість зношування є однаковою як при 20°C , так і при 500°C (табл.). Необхідно зазначити, що об'єм зношування керамічної кульки при цьому є більший ніж у випадку азотування поверхні та покриття на основі нітриду хрому. Найкращі властивості продемонструвало багатошарове покриття TiN/CrN, коефіцієнт тертя знизився в 2 рази, а питома швидкість зношування є на рівні кращих характеристик окремих покриттів CrN та TiN. У парі тертя важливим чинником є поєднання трибологічних властивостей як тіла тертя (досліджуване покриття), так і контртіла (керамічна кулька). У випадку тертя пари “багатошарове покриття CrN/TiN- керамічна кулька” знос керамічної кульки був найменшим.

Таблиця – Трибологічні характеристики досліджуваних пар тертя при 20 і 500°C : коефіцієнт тертя (μ), питома швидкість зношування покриття (W) та зношування кульки (W_b)

Матеріал	μ		$W, \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$		$W_b, \text{ mm}^3$	
	20°C	500°C	20°C	500°C	20°C	500°C
BT6 вихідний	0,7	0,8	$9,06 \cdot 10^{-4}$	$1,74 \cdot 10^{-3}$	$1,20 \cdot 10^{-2}$	$8,36 \cdot 10^{-3}$
BT6 азотування	0,6	0,7	$8,58 \cdot 10^{-6}$	$6,66 \cdot 10^{-4}$	$1,31 \cdot 10^{-4}$	$4,23 \cdot 10^{-3}$
BT6 CrN	0,6	1,0	$1,97 \cdot 10^{-6}$	$1,47 \cdot 10^{-4}$	$1,65 \cdot 10^{-4}$	$4,40 \cdot 10^{-4}$
BT6 TiN	1,0	1,0	$1,66 \cdot 10^{-5}$	$1,09 \cdot 10^{-5}$	$2,77 \cdot 10^{-4}$	$1,55 \cdot 10^{-3}$
BT6 TiN/CrN	0,3	0,5	$1,09 \cdot 10^{-6}$	$1,77 \cdot 10^{-5}$	$6,03 \cdot 10^{-5}$	$2,27 \cdot 10^{-4}$

Таким чином формування багатошарового покриття на основі нітридів Ti і Cr на попередньо азотованому сплаві BT6 забезпечує кращу зносостійкість в парі з керамічною кулькою при 20°C і 500°C порівняно з одношаровими покриттями на основі CrN або TiN.

Робота виконана за фінансової підтримки НАН України (проект № 6.4/24-П програми «Підтримка розвитку основних напрямів наукових досліджень» (КПКВК 6541230)).

УДК 669.018-419.8

Кирилаха С. В.
аспірантка, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Коваленко М. В.
аспірант, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Мітяєв О. А.
д-р техн. наук, професор, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Повзло В. М.
ст. викладач, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ АЛЮМО-СВИНЦЕВИХ (Al – Pb) КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Відомо, що алюмінієві сплави характеризуються доволі добрими опором втомі, корозійною стійкістю в мастилах, непоганими показниками задиристійкості, гарними антифрикційними властивостями та високою теплопровідністю. З появою важконавантажених двигунів в авто- та тракторобудуванні, транспортному машинобудуванні, енергетиці та інших галузях промисловості з'явилася гостра потреба у підшипниках, що мають високу задиристійкість та характеризуються комплексом властивостей, котрі, значною мірою, притаманні алюмінієвим сплавам. У зв'язку з цим, у промисловості з'явилась тенденція до заміни антифрикційних сплавів на свинцевій та олов'яній основах на алюмінієві.

На підставі вищезазначеного, для виготовлення таких підшипників, розглядається можливість застосування композиційного матеріалу на основі системи Al – Pb. Дослідним шляхом встановлено, що такі композити мають здатність добре опиратися задиранню при наявності ультратонких мастильних шарів і ця здатність найбільш повно досягається та реалізується при вмісті $\geq 14\% \text{Pb}$. Система Al – Pb відноситься до монотектичних і при охолодженні розплавів спостерігається широка область у якій не відбувається процес змішування алюмінію та свинцю, що не дозволяє традиційними способами виготовляти підшипники ковзання з цих сплавів.

Матеріали авіаційного виробництва

На сьогодні розглядається спосіб виготовлення алюмо-свинцевих підшипників ковзання сутність котрого полягає в попередньому отриманні алюмінієвої заготовки з визначеним рівнем відкритої пористості, що в подальшому, крізь пори, заповнюється розплавом свинцю або сплавів на його основі. Попередні дослідження процесів формування композиту продемонстрували, що задовільне заповнення піноалюмінію свинцем або бабітом без наявності візуальних дефектів композиційного матеріалу спостерігалось при температурі заливання 450...500°C і попередньому нагріванні піноалюмінію до 200...350°C. Густина композиційного матеріалу Al – Pb становила 8,15...8,25 г/см³, а композиту AM5 + B16 – 6,10...6,45 г/см³, що на 30% нижче за густину Pb і бабіту B16 відповідно.

Значення коефіцієнту тертя ковзання без змащення композиційного матеріалу AM5 + B16 знаходились у межах 0,155...0,287, що відповідає значенням коефіцієнта тертя бабіту B16.

Більш широке застосування розглянутої технології виготовлення антифрикційних матеріалів економічно доцільне та призведе до збільшення терміну роботи важконавантажених вузлів машин і обладнання, а також буде сприяти зменшенню кількості ремонтів та значному скороченню витрат часу, праці та коштів на їх проведення.

УДК 669.714.004.8

Лофердюк В. І.
бакалавр, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Мітяєва З. А.
бакалавр, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Мітяєв О. А.
д-р техн. наук, професор, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Повзло В. М.
ст. викладач, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

НАНОМОДИФІКУВАННЯ ПОРШНЕВОГО СИЛУМІНУ AK12M2MgH

Зараз в промисловості України використовують два типи алюмінієвих сплавів: 1) первинні, що одержано методом електролізу та 2) вторинні, що одержано з відходів виробництва (ливники, брак, спрацьовані деталі і вироби, стружка алюмінію). До переваг першого методу відносяться високі чистота і механічні властивості, до недоліків – високозатратна технологія виробництва. Перевагами другого методу є низька вартість шихти та дешева технологія виробництва, недоліками – забруднення шихти та низька якість виробів.

Науковцями НУ «Запорізька політехніка», Дніпропетровського національного університету імені О. Гончара, Національної металургійної академії України доведено, що при використанні вторинної шихти найбільш ефективним і технологічним методом підвищення якості виробів є модифікування рідкого металу. В нашій роботі досліджували вплив сумісного модифікування комплексом МК-1 (патент України №46094) і фулеренової черні розміром частинок 40...50 нм на механічні властивості силуміну AK12M2MgH (табл. 1). Результати дослідження засвідчили позитивний вплив фулеренової черні, як наномодифікатора, на механічні властивості сплаву AK12M2MgH, а також засвідчили можливість підвищення якості вторинних силумінів в результаті комплексної обробки – мікро- та наномодифікування.

Матеріали авіаційного виробництва

Таблиця 1 – Вплив рафінування та модифікування на механічні властивості сплаву АК12М2МгН при 20°C та 300°C (старіння 210°C, впродовж 6 годин)

Варіанти	Рафінувально-захисний флюс, %	Модифікувальний комплекс МК-1, мас. %	Фулеренова суміш, мас. %	20°C			300°C	
				σ_b , МПа	δ , %	HRB	σ_b , МПа	δ , %
1	2,0	-	-	154,3	0,4	950	97,0	1,5
2	2,0	0,1	-	192,2	0,8	1070	117,0	2,6
3	2,0	0,1	1,0	224,0	0,5	1280	128,1	2,3

Примітка: Застосовано пресовану суміш порошку А85 + фулеренова чернь у пропорції 5:1.

Результати досліджень засвідчили наступні факти.

1. Додатково підтверджено позитивний вплив модифікувального комплексу МК-1 на рівень механічних властивостей вторинного поршневого сплаву АК12М2МгН (АЛ25) при температурах 20 і 300°C.

2. Встановлено позитивний вплив фулеренової черні в якості наномодифікатора на механічні властивості сплаву АК12М2МгН (АЛ25) при кімнатній (20°C) та робочих (300°C) температурах. Надано аргументоване пояснення цьому явищу.

3. Встановлено факт низького рівня засвоєння фулеренової черні та наявності певних труднощів при її введенні до розплавів, що потребує подальшого вивчення та відпрацювання.

4. Відмічено, що спосіб введення фулеренової черні до розплаву, впливає на рівень механічних властивостей модифікованого сплаву.

5. Результати виконаних досліджень добре узгоджуються з даними робіт та мають практичну цінність та розширюють можливості підвищення якості вторинних силумінів шляхом їх мікро- та наномодифікування.

Лазарєв І. О.
аспірант, Національний університет
«Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна

Присяжнюк П. М.
д-р техн. наук, доцент, Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, Україна

Роп'як Л. Я.
д-р техн. наук, професор, Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, Україна

ЛЕГУВАННЯ ЖАРОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ ОКСИДУ АЛЮМІНІЮ

Оксиди багатьох металів вентильної групи (алюміній, титан, ніобій, тантал, цирконій та інші) характеризуються досить високою температурою плавлення і знаходять широке застосування як складові компоненти жаростійких покриттів. Перспективною технологією формування оксидних покриттів на вказаних металах є плазмове електролітичне оксидування, яке інтенсивно розвивається [1–4]. Про це свідчить велика публікаційна активність багатьох дослідників. Для покращення захисних властивостей оксидних покриттів дослідники проводять раціональний вибір сплавів і функціонально градієнтних матеріалів, які піддаються плазмовому електролітичному оксидуванню, компонентного склад електролітів, технологічних режимів процесу тощо.

Тверді розчини на основі оксиду алюмінію Al_2O_3 з різним вмістом хрому (Cr) представляють значний потенціал для використання для вдосконалення захисних покриттів, особливо оксидних покриттів, які застосовуються в авіаційній та аерокосмічній галузях, завдяки своїй винятковій твердості, високотемпературній стабільності та регульованим властивостям. Слід зазначити, що такого типу матеріали завдяки високій твердості використовуються як абразиви для шліфувальних кругів. У цьому дослідженні систематично досліджено структурні, електронні та термомеханічні властивості твердих розчинів $(\text{Al}_{1-x}\text{Cr}_x)_2\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$) за допомогою розрахунків перших принципів. Встановлено, що поступове заміщення алюмінію хромом призводить до безперервної еволюції електронної структури, переходу від переважно іонного каркасу в оксиді алюмінію Al_2O_3 до змішаної іонно-ковалентної системи в Cr_2O_3 . Ширина забороненої зони значно

звужується зі збільшенням вмісту Cr завдяки введенню d-станів Cr поблизу рівня Фермі. При цьому підвищується електронна провідність. Характер зв'язку змінюється, оскільки зв'язки Cr-O отримують ковалентний внесок, зміцнюючи таким чином решітку та покращуючи термічну та механічну стабільність. Механічний аналіз показує компроміс між твердістю та пластичністю, причому склади, багаті Cr, досягають підвищеної пластичності та термічної стабільності, що робить їх ідеальними компонентами для покриттів, які формують плазмовим електролітичним окисдуванням. Ці результати демонструють, що композиції, збагачені хромом ($\text{Al}_{1-x}\text{Cr}_x$) $_2\text{O}_3$, є універсальними матеріалами для складних промислових застосувань, які вимагають покращених індивідуальних електронних, механічних і теплофізичних властивостей.

Отримані результати теоретичних досліджень слугують науковою основою для вдосконалення хімічного складу жаростійких оксидних покриттів, сформованих плазмовим електролітичним окисдуванням алюмінію та його сплавах [1–3] або на алюмінієвих покриттях [4] і можуть використовуватись для раціонального вибору компонентного складу електролітів і армуючих частинок.

Фінансування. Дослідження виконано за кошти Національного фонду досліджень України (National Research Foundation of Ukraine) за проектом НФДУ № 2023.04/0160, 0124U003748 «Розробка технології формування жаростійких покриттів плазмовим електролітичним окисдуванням на деталях авіаційної та ракетно-космічної техніки» (конкурс «Наука для зміцнення обороноздатності України»).

Список літератури

1. Introduction to Plasma Electrolytic Oxidation-An Overview of the Process and Applications / Simchen F., Sieber M., Kopp A., Lampke T. // *Coatings*, 2020. – Vol. 10. – No. 7. art. no. 628. <https://doi.org/10.3390/coatings10070628>
2. Optimization of Plasma Electrolytic Oxidation Technological Parameters of Deformed Aluminum Alloy D16T in Flowing Electrolyte / et al. // *Ceramics*, 2023. – Vol. 6. – No. 1. – P. 146–167. <https://doi.org/10.3390/ceramics6010010>
3. Influence of the Porosity of a Plasma-Electrolytic Coating on the Corrosion Resistance of D16 Alloy / Student M. M., Ivasenko I. B., Posuvailo V. M. // *Materials Science*, 2019. – Vol. 54. – No. 6. – P. 899–906. <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00278-z>
4. Design of a Two-Layer Al-Al $_2\text{O}_3$ Coating with an Oxide Layer Formed by the Plasma Electrolytic Oxidation of Al for the Corrosion and Wear Protections of Steel / et al. // *Progress in Physics of Metals*, 2023. – Vol. 24. – No. 2. – P. 319–365. <https://doi.org/10.15407/ufm.24.02.319>

УДК 539.43

Алексєєнко М. І.
аспірант, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Акімов І. В.
канд. техн. наук, доцент, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГРАФІТИЗОВАНИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ГАЛЬМІВНИХ СИСТЕМ

Графітізовані сталі, як сплави, що містять в структурі графітові вклучення, характеризуються рядом цінних властивостей: жароміцністю і теплопровідністю [1], досить високими стійкістю до втомного руйнування, тощо. Крім того, відомо, що графітізовані сталі широко використовуються в якості антифрикційного матеріалу. За даними робіт [1] такі сталі, завдяки вклученням графіту, що виступає в ролі природного мастила, вони характеризуються низькою схильністю до адгезії, добре оброблюються різанням, теплопровідністю і стабільністю властивостей при термічному циклуванні. Це дозволяє використовувати їх, наприклад, для штампів холодного кування, волоочильних інструментів, обойм підшипників кочення, черв'ячних коліс, деталей склоформуючих машин, роликового інструменту та інших виробів [2]. Проте, графітізовані сталі, як клас конструкційних матеріалів, вивчені недостатньо. У літературі є фрагментарні відомості про їх застосування для конкретних деталей, а також немає чіткого опису їх можливих сфер застосування. Відомі марки сталей, на які існують технічні умови, вимагають тривалого і енергоємного графітізуючого відпалу при виробництві виробів з них. Ці фактори істотно стримують широке застосування графітізованих сталей. В Україні виробництво таких сталей фактично не налагоджено, відсутні технічні вимоги та державні стандарти, які б регламентували їх склад та вимоги до якості.

Аналіз властивостей графітізованих сталей показує, що однією з можливих сфер їх застосування є виготовлення гальмівних колодок залізничного призначення. Згідно з даними робіт [3], найбільш часто використовуваними матеріалами для залізничних колодок є сірі фосфорні чавуни, які характеризуються низькою міцністю (зносостійкістю) і зниженням фрикційних властивостей при підвищенні температури, що виділяється при терті ковзання. Застосовуються також композитні накладки і вони позбавлені цих недоліків, але при цьому

Матеріали авіаційного виробництва

мають низьку теплопровідність і термостійкість, що призводить як до зниження механічних властивостей матеріалу, так і до сильного термічного впливу на залізничне колесо, що є небажаним фактором. У зв'язку з цим звертається увага на графітізовані сталі, які, згідно з [4] на відміну від чавунів, не втрачають своєї фрикційної здатності при підвищенні температури. Слід зазначити, що визначення фрикційних і температурних залежностей цих матеріалів від їх хімічного складу з метою можливого використання графітізованих сталей в якості матеріалу для залізничних гальмівних колодок до теперішнього часу не описано в літературі. Тож, в роботі була проведена низка випробувань триботехнічного характеру експериментальних зразків графітізованих сталей. Отримані при цьому результати дозволили визначити напрямок впливу їх хімічного складу на прояв сумісності до тертя контакту зі сталлю 40Х. Встановлено, що склад графітізованої сталі: 1,54%С; 0,85%Cu; 1,07%Si; 0,22%Al; 0,41%Mn; 0,13%Ni; 0,15%Cr; 0,022%S; 0,018%P при швидкості ковзання не менше 176 м/хв призводить до кращої сумісності та контакту тертя. При цьому температурна інтенсивність контакту при його розвантаженні нижче, ніж у стандартного чавунного АСК-2. Однак виявлені особливості формування третього тіла в досліджуваних трибоінтерфейсах обумовлюють необхідність додаткових триботехнічних випробувань при високих швидкостях ковзання.

Список літератури

1. Акімов, І. В. Підвищення високотемпературної витривалості графітізованих сталей / І.В. Акімов, І. П. Волчок // FIDES. Intern. Forum for the Development of Education and Science Proc. – Norway : Lulu Press Inc., 2010. – 61 p.
2. Разрушение графитизированных сталей при циклических нагрузках / И. В. Акимов, И. П. Волчок, А. А. Митяев и др. // Литье и металлургия. – 2010. – № 4. – С. 58–61.
3. Асташкевич Б.М. Свойства и кинетика формирования вторичных структур на поверхностях трения фрикционных фосфористых чугуновых тормозных железнодорожных колодок // Трение и износ. – 1998. – Т. 19. – № 1. – С. 75–85.
4. Tsujimura Taro, Arai Hiroshi, Fujiwara Naoya. Development of high performance special cast iron brake shoes // Quart. Repts Railway Techn. Res. Inst. – 1990. – № 4. – P. 218–224.

Матеріали авіаційного виробництва

Сохрякова І. М.

магістр, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Безсонов П. Г.

магістр, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Мітяєв О. А.

д-р техн. наук, професор, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

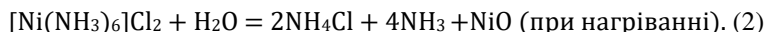
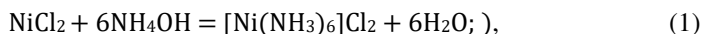
Повзло В. М.

ст. викладач, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ НАНОМОДИФІКАТОРА АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

Пріоритетним напрямком розвитку сучасного світового матеріалознавства є наноматеріали і нанотехнології. Однією з основних переваг нанотехнологій є практично необмежені можливості мініатюризації об'єктів і керування їх властивостями на атомарно-молекулярному рівні. В матеріалознавстві значний прогрес пов'язано з ефективним впливом нанорозмірності структури на фізико-механічні та службові властивості алюмінієвих сплавів.

Отримання наномодифікатору починали з приготування золь-гель каталізатору. Каталітичне з'єднання отримували розчиненням нікол (II) хлориду в етанолі (1М розчин) з подальшим додаванням насиченого водного розчину амоніаку. Після отримання гелю його розчинник відганяється, а на підкладці залишаються частинки ніколу. Процеси описуються наступними реакціями:



Потім на підкладку наносили гель $[\text{Ni}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_2$ в етанолі. Після нанесення каталізатора підкладку поміщали в реактор і проводили технологічний процес, в результаті якого виходив чорний нагар, що мав дендритну структуру, зумовлену агрегацією ніколових міцел при висиханні гелю, на яких згодом зростали нанотрубки. Золь-гель каталізатор дозволив отримати на підкладці досить тонкі структури

Матеріали авіаційного виробництва

розміром 10...30 нм. Цей метод отримання нанотрубок реалізується в діапазоні температур від 500 до 900 °C, при цьому не існує яскраво вираженої залежності діаметру нанотрубок від температури.

Діаметр нанотрубки визначається діаметром частинок, що ініціювали її зростання. У вуглецевій нанотрубці кінцева частина знаходиться у фазі Ni_3C , а інтеркаліровані частини в порожнині в монокристалічній фазі Ni.

Отримані нанотрубки було додано до складу модифікувального комплексу МК-1, котрий використовували для оброблення поршневого сплаву АЛ25 (АК12М2МгН).

Результатом впливу даної обробки було:

- стабілізація структури сплаву у діапазоні робочих температур (300°C);
- підвищення міцності сплаву на 17 % та 10 % при 20 °C та 300 °C відповідно;
- зниження температурного коефіцієнта лінійного розширення сплаву на 5,60...5,75 %;
- збільшення часу до руйнування при $\sigma = 50\text{МПа}$ та $T = 300\text{ °C}$ в 2,4 рази у порівнянні із заводською технологією.

УДК 621.92:621.793

Романів М. М.
аспірант, Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

Роп'як Л. Я.
д-р техн. наук, професор, Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ПОКРИТТІВ НА АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВАХ ПЛАЗМОВИМ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИМ ОКСИДУВАННЯМ

Зміцнення тонкого поверхневого шару масивної деталі є прогресивним напрямком у технології машинобудування, оскільки дозволяє економити дорогавартісні леговані сталі та інші матеріали, збільшувати ресурс роботи і надійність механізмів, машин та підвищувати ефективність виробництва. До найважливіших властивостей алюмінієвих сплавів, які дозволяють використовувати їх у різних галузях промисловості, відноситься висока корозійна стійкість і відносно високе співвідношення міцнісних характеристик і питомої ваги. Водночас такі сплави мають дуже хороші характеристики щодо повторного використання. Проте низька зносостійкість деталей з алюмінієвих сплавів під час експлуатації за підвищених температур перешкоджає їх ще ширшому застосуванню.

Останнім часом набувають широкого застосування технологічні методи поверхневого зміцнення з використанням висококонцентрованих джерел енергії, зокрема й плазми. Сутність цих методів поверхневого зміцнення полягає у тому, що на відносно невеликі об'єми металу діють з великими швидкостями концентровані потоки енергії високої інтенсивності з наступним швидким охолодженням. Такі умови обробки дозволяють отримувати задані фізико-механічні, електрохімічні, корозійні та експлуатаційні характеристики деталей машин та елементів конструкцій, в тому числі й авіаційної та ракетно-космічної техніки. Про актуальність дослідження властивостей оксидних покриттів свідчить те, що у даний час є висока наукова активність щодо дослідження процесів плазмового електролітичного оксидування різних металів та сплавів [1–3], в тому числі алюмінієвих покриттів [1, 5].

Для успішного розроблення і впровадження енергоефективної технології плазмового електролітичного оксидування алюмінієвих

Матеріали авіаційного виробництва

сплавів у виробництво необхідно було дослідити вплив складу електроліту та струмових параметрів на формування оксидного жаростійкого покриття і вирішити комплекс питань підвищення несучої здатності основи, теоретично обґрунтувати та експериментально перевірити економічно доцільні параметри шорсткості поверхні після механічної обробки перед операцією плазмового електролітичного оксидування в електроліті. Особливу увагу було приділено проблемі підвищення продуктивності та енергоефективності технологічного процесу формування жаростійких оксидних покриттів плазмовим електролітичним оксидуванням. У результаті виконання досліджень розроблено енергоефективну технологію плазмового електролітичного оксидування, яка включає підготовку поверхні механічною обробкою перед формування оксидних покриттів, підвищення міцності зчеплення покриття з основою, фінішну механічну обробку деталей з оксидними жаростійкими покриттями та удосконалено конструкцію установки для плазмового електролітичного оксидування алюмінієвих сплавів, яка дозволяє вибирати раціональну форму електричного сигналу, частоту напруги, густину струму, співвідношення анодного і катодного струму.

Результати проведених досліджень дозволили удосконалити технологію плазмового електролітичного оксидування деталей із алюмінієвих сплавів, підвищити жаростійкість покриттів, покращити енергоефективність та екологічність і знизити шкідливий слід виробництва у порівнянні з хромуванням, а також забезпечити надійність і довговічність деталей машин за підвищених температур.

Фінансування. Дослідження виконано за кошти Національного фонду досліджень України (National Research Foundation of Ukraine) за проектом НФДУ № 2023.04/0160, 0124U003748 «Розробка технології формування жаростійких покриттів плазмовим електролітичним оксидуванням на деталях авіаційної та ракетно-космічної техніки» (конкурс «Наука для зміцнення обороноздатності України»).

Список літератури

1. Clyne T. W. A review of recent work on discharge characteristics during plasma electrolytic oxidation of various metals / Clyne T. W., Troughton S. C. // International Materials Reviews, 2019. – Vol. 64. – No. 3. – P. 127–162. <https://doi.org/10.1080/09506608.2018.1466492>
2. Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Process-Processing, Properties, and Applications / Sikdar S., Menezes, P. V, Maccione, R. // Nanomaterials, 2021. – Vol. 11. – No. 6. art. no. 1375. <https://doi.org/10.3390/nano11061375>

3. Introduction to Plasma Electrolytic Oxidation-An Overview of the Process and Applications / Simchen F., Sieber M., Kopp A., Lampke T. // Coatings, 2020. – Vol. 10. – No. 7. art. no. 628. <https://doi.org/10.3390/coatings10070628>

4. Optimization of Plasma Electrolytic Oxidation Technological Parameters of Deformed Aluminum Alloy D16T in Flowing Electrolyte / Ropyak L., Shihab T., Velychkovych A. et al. // Ceramics, 2023. – Vol. 6. – No. 1. – P. 146–167. <https://doi.org/10.3390/ceramics6010010>

5. Design of a Two-Layer Al-Al₂O₃ Coating with an Oxide Layer Formed by the Plasma Electrolytic Oxidation of Al for the Corrosion and Wear Protections of Steel / Ropyak L., Shihab T., Velychkovych A. et al. // Progress in Physics of Metals, 2023. – Vol. 24. – No. 2. – P. 319–365. <https://doi.org/10.15407/ufm.24.02.319>УДК 669.715

Дерев'ягін М. В.

аспірант каф. менеджменту,
Національний університет «Запорізька політехніка»
м. Запоріжжя, Україна

Прушківський В. Г.

д-р економ. наук, проф.
Національний університет «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

РОЗВИТОК АВІАБУДІВНОЇ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ ТА АКТИВНОГО ВПРОВАДЖЕННЯ ІНДУСТРІЇ 4.0

Світовий ринок виробництва авіаційної техніки сьогодні характеризується дедалі інтенсивнішою міжнародною кооперацією кожного з етапів виробництва та пов'язаних із нею процесів. Під впливом даного фактору розвиток співпраці із зарубіжними виробниками та вбудовування у глобальні ланцюги створення вартості стає для національних авіавиробників нагальною необхідністю, оскільки дає можливість залучати інвестиції, успішно модернізувати виробництво і як результат – створювати нову конкурентоспроможну авіатехніку[1].

До початку російської агресії проти України у 2014 році машинобудування було однією з найрозвиненіших галузей української економіки, забезпечуючи близько 10% ВВП.

Показники машинобудування після 2014 року свідчать про кризу, що загострилася після вторгнення РФ у 2022 році: понад 30% підприємств зруйновано, а виробництво знизилося на понад 40% порівняно з 2021 роком.[2,3].

У 2023 році оборонна промисловість стала ключовим двигуном економіки: ОПК зріс утричі порівняно з 2022 роком, а у 2024 році прогнозується зростання в шість разів. Активно розвиваються напрямки бронетехніки, морських та радарних систем, високоточної зброї, боєприпасів, авіабудування та авіаремонт.

Слід відзначити, що активізація бойових дій може стати каталізатором для швидкого реформування галузі машинобудування, оскільки війна не лише підкреслила, а й загострила проблеми слабкості, технологічної відсталості, кадрового дефіциту галузі [4].

Авіабудування залишається пріоритетним напрямом розвитку завдяки високій прибутковості та доданій вартості продукції, залучаючи фахівців з різних сфер та впроваджуючи новітні технології. Українські

Підтримка та організація виробництва

авіабудівні підприємства переважно забезпечують оборонні потреби, що потребує мобільності та цифровізації процесів. В умовах зруйнованої інфраструктури, структурної трансформації економіки й міжнародної допомоги, воєнний час може сприяти швидкому розвитку галузі для наближення до світових стандартів.

Індустрія 4.0 включає технології, що можуть істотно підвищити ефективність виробництва навіть у складних умовах: Інтернет речей для контролю якості та реагування на несправності; штучний інтелект для прогнозування поломок і оптимізації процесів, робототехніку для стабільності й безпеки виробництва; також 3D-друк для швидкого виготовлення деталей, знижуючи витрати на транспортування й залежність від постачальників.

Для швидкого впровадження технологій Індустрії 4.0 доцільно використовувати міжнародну кооперацію для доступу до новітніх рішень, розвивати власні технології для оборонного сектору та пріоритетно цифровізувати логістику й управління ресурсами.

Розвиток авіабудівної галузі України з урахуванням Індустрії 4.0 є важливим кроком на шляху до забезпечення обороноздатності країни та стабільного економічного зростання. Незважаючи на значні виклики, впровадження цифрових технологій здатне зміцнити авіабудівну галузь, підвищити її конкурентоспроможність та здатність адаптуватися до умов війни. Розробка власних технологій, залучення іноземних інвестицій та співпраця з міжнародними партнерами є перспективними напрямками для подальшого розвитку.

Список літератури

Прушківська, Е. В. Тенденції розвитку авіаційної промисловості в умовах глобальних викликів. / Е. В. Прушківська, В. Г. Прушківський, О. С. Коптев // Адаптивне управління: теорія і практика. Серія Економіка. Випуск 15(30) – 2023. – [https://doi.org/10.33296/2707-0654-15\(30\)-05](https://doi.org/10.33296/2707-0654-15(30)-05)

Трансформаційні зміни у машинобудуванні України під впливом воєнних дій [Електронний ресурс] / О. В. Пігчук. – 2024. – 37 с.

Трансформація моделей економічної поведінки машинобудівних підприємств за умов розвитку у воєнний час [Електронний ресурс] / Н. П. Карачина. – 2024. – 55 с.

Проблеми розвитку промисловості України та її кадрового забезпечення в умовах війни [Електронний ресурс] / В. П. Антонюк. – 2024. – 55 с.

УДК 621:37.01:004.9

Лазарєва О. О.
аспірант, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Гембель І. Ю.
аспірант, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Сахнюк Н. В.
канд. техн. наук, доцент, АК «Мотор Січ»,
м. Запоріжжя, Україна

Гембель В. Й.
завідувач лабораторії, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА ОСВІТНІЙ ПРОЦЕС СТУДЕНТІВ ТЕХНІЧНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ У ЗАКЛАДАХ ВИЩОЇ ОСВІТИ ТА ЇХ РОЛЬ У ПОКРАЩЕННІ ЯКОСТІ НАВЧАННЯ

Для підготовки студентів у закладах вищої освіти (ЗВО) за галуззю знань «Механічна інженерія» яка в собі вдало поєднує такі спеціальності, як «Галузеве машинобудування», «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» та інші, цифрові технології відіграють ключову роль у підвищенні ефективності освітнього процесу та підготовки до сучасних професійних викликів.

Освітні цифрові технології стали невід'ємною частиною викладання і навчання, зокрема у сфері авіаційної та ракетно-космічної техніки. Мета даного дослідження полягає у вивченні впливу цифрових технологій на процес навчання студентів технічних спеціальностей і їх роль у покращенні якості освіти. Серед завдань дослідження можна виокремити такі пункти: визначення сутності та основних характеристик цифрових технологій та аналіз впливу цих технологій на навчальний процес у ЗВО, зокрема на студентів авіаційної та ракетно-космічної техніки [1].

Методологія дослідження включає використання загальнонаукових методів: аналізу, синтезу, порівняння, узагальнення і системно-структурного аналізу.

Підтримка та організація виробництва

Результати дослідження демонструють позитивний вплив цифрових технологій на вищу освіту. Студенти технічної галузі отримують доступ до різноманітних ресурсів, що сприяє підвищенню рівня знань та навичок, необхідних для розуміння складних технічних систем, якими є, наприклад, авіаційна та ракетно-космічна техніка. Використання дистанційного навчання дозволяє забезпечити рівні можливості для всіх студентів, а також стимулює до навчання впродовж життя. Цифрові платформи, зокрема симулятори та віртуальні лабораторії, забезпечують студентам доступ до реалістичних моделей, що відображають реальні процеси в авіаційній техніці [2].

Дослідження також підкреслює, що ефективне впровадження цифрових технологій в освітній процес у галузі авіаційної техніки забезпечує гнучкість навчання, що є важливим для студентів, які мають різні темпи засвоєння матеріалу. Вони допомагають покращити якість комунікації між студентами і викладачами та стимулюють індивідуальний підхід до кожного студента.

Практичне значення результатів дослідження полягає у тому, що висновки і рекомендації можуть бути використані для вдосконалення навчальних планів, розробки нових методів навчання з використанням цифрових платформ, а також для покращення комунікації та взаємодії між студентами й викладачами під час навчання в авіаційній та інших сферах.

Перспективним напрямом подальших досліджень з цієї проблематики є розробка ефективних педагогічних стратегій для інтеграції цифрових технологій у різні аспекти навчального процесу, що дасть змогу стимулювати освітню сферу та покращить викладацьку діяльність у освітньому інформаційно-технологічному просторі.

Список літератури

1. Barton E. A., Dexter S. Sources of teachers' self-efficacy for technology integration from formal, informal, and independent professional learning. *Educational Technology research and development*, 2020, 68, P. 89–108.
2. Mercader C., Gairín J. University teachers' perception of barriers to the use of digital technologies: the importance of the academic discipline. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 2020, 17(1), 4.

УДК 004

Букатка Ю. С.
аспірант, Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

Копей В. Б.
д-р техн. наук, професор, Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, Україна

ДОСВІД ВИКОРИСТАННЯ PYTHON ТА ЇЇ ПАКЕТІВ ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПІДТРИМКИ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ВИРОБУ

Python сьогодні є найбільш популярною і перспективною мовою прикладного програмування загального призначення. Основна її особливість – це простота розуміння і складання програмного коду. Це дало поштовх бурхливому розвитку пакетів для розв’язування різних прикладних задач, у тому числі задач інформаційної підтримки життєвого циклу (ЖЦ) виробу. З використанням вільних Python-пакетів сьогодні є можливим розроблення якісної PLM-системи для підтримки етапів проектування, виготовлення та експлуатації виробу. Проекти [1-7] свідчать про можливість простого об’єднання різнотипних пакетів в єдину ефективну PLM-систему. Як правило базовими пакетами в таких системах повинні бути пакети для роботи з масивами, чисельними методами і візуалізацією даних (NumPy, SciPy, Matplotlib). Для забезпечення автоматизованого проектування виробу (CAD, CAM) можуть бути використані пакети PythonOCC, FreeCAD, CadQuery, які ґрунтуються на потужному вільному геометричному ядрі OpenCASCADE [2, 3]. Ці пакети можуть бути доповнені пакетами FEA (Pycalculix, scikit-fem, Gmsh), симуляції динаміки жорстких тіл (PyBullet, PyODE), моделювання і оптимізації складних мультифізичних динамічних систем (Gekko, OMPython, rutmoca) [2-4]. Аналітичні задачі можуть бути розв’язані за допомогою пакету символьної математики SymPy [4, 5]. Його використовують такі спеціальні пакети як Optlang (оптимізаційні задачі), SimuPy (динамічні системи), PyDu (динаміка багатьох тіл), Scikit-fdiff (метод скінченних різниць), SfePy (метод скінченних елементів). В проекті [4] SymPy використано для геометричного моделювання гвинтових ліній різнотипних різьбових з’єднань. На основі SymPy та SciPy розроблено Python-пакет для компонентно-орієнтованого моделювання складних динамічних систем [1]. Інтерактивна робота з PLM-системою може бути забезпечена засобами: візуалізації

Підтримка та організація виробництва

тривимірних даних (pyglet, VTK, Mayavi, PyVista), створення графічного інтерфейсу користувача (Tkinter, wxPython, PyQt) та інтерактивних документів (IPython, Jupyter, Google Colab, JupyterLite). Jupyter є основою інтерфейсу користувача в PLM-системі різьбових з'єднань [4]. На етапах виробництва і експлуатації виробу можуть бути використані системи управління виробничими процесами, CNC-системи, системи автоматизованого технічного контролю та SCADA-системи, які ґрунтуються на мікроконтролерах та використовують пакети PySerial, PyFirmata, PyScada, інтерпретатор Мікроpython [4, 7]. На різних етапах ЖЦ виробу розв'язуються складні задачі, які потребують застосування методів системного аналізу, штучного інтелекту, інженерії знань, аналізу даних та машинного навчання. Для цього можна використати пакети pydatalog, python-constraint, NetworkX, Pandas, scikit-learn, keras та інші [3, 5, 6]. Ефективна робота багатьох компонентів PLM-системи потребує інтеграції в ній засобів паралельних обчислень (Dask, Celery, Ray). На основі концепції акторів та пакету Ray була забезпечена паралельна робота компонентів мультиагентної PLM-системи [4]. Досягнення ефекту синергії потребує не простого поєднання різнотипних пакетів, а створення їхньої системи з оптимальними зв'язками. Для цього слід опиратись на теоретико-системні принципи, зокрема принципи самоорганізації складних систем. Це було враховано під час розроблення мультиагентної PLM-системи [4].

Список літератури

1. Pycodyn. URL: <https://github.com/vkopey/pycodyn> (accessed 9.11.24).
2. ThreadsOCC. URL: <https://github.com/vkopey/ThreadsOCC> (accessed 9.11.24).
3. ThreadsPLM. URL: <https://github.com/vkopey/ThreadsPLM> (accessed 9.11.24).
4. ThreadsPLM-MAS-. URL: <https://github.com/vkopey/ThreadsPLM-MAS-> (accessed 9.11.24).
5. ThreadES. URL: <https://github.com/vkopey/ThreadES> (accessed 9.11.24).
6. IRclassify. URL: <https://github.com/vkopey/IRclassify> (accessed 9.11.24).
7. CNC3018Pro-and-Robot-Arm. URL: <https://github.com/vkopey/CNC3018Pro-and-Robot-Arm> (accessed 9.11.24).

УДК 656.7.025

Лазарєв І. О.
аспірант, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Лазарєва О. О.
аспірантка, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Сахнюк Н. В.
канд. техн. наук, доцент, АК «Мотор Січ»,
м. Запоріжжя, Україна

Пашечко М. І.
д-р техн. наук, професор,
Львівський політехнічний інституту, Польща

ОГЛЯД АКТУАЛЬНИХ ПРОБЛЕМ РОЗВИТКУ ПАСАЖИРСЬКИХ АВІАПЕРЕВЕЗЕНЬ В УКРАЇНІ ПІД ЧАС ВОЄННОГО СТАНУ

Пасажирські авіаперевезення в Україні в умовах війни стикаються зі значними викликами, які впливають на різні аспекти авіаційної галузі. Сучасні тенденції свідчать про необхідність глибокого аналізу та пошуку дієвих стратегій для забезпечення стабільності авіаперевезень у період військової агресії Російської Федерації проти України. На час війни пасажирські перевезення повністю припинені через підвищену небезпеку. Військові дії вимагають перегляду маршрутів та напрямків перевезень через обмеження руху та питання безпеки. Зростання нестабільності та загроз безпеці спричиняє зміни у ціноутворенні авіакомпаній і рівнях конкуренції по всій Європі. Військові дії вже призвели до руйнування аеропортів, наземної інфраструктури, а також до втрат у авіаційній техніці та серед персоналу.

Актуальність дослідження полягає в необхідності визначення стратегічних шляхів вирішення проблем, що виникають у зв'язку з воєнним станом.

Аналіз кращих світових практик управління авіаперевезеннями пасажирів дозволив виділити концепції [1, 2], які можуть бути застосовані до українських реалій, зокрема у рамках процесів післявоєнної відбудови, адже на сьогодні безпекова ситуація не дозволяє відкрити авіасполучення. Реалізація цих концепцій має великий потенціал для забезпечення життєвої важливості галузі та зрушення у напрямку сталого розвитку.

На основі проведених досліджень та обговорень пропонуються конкретні рекомендації та практичні заходи для поліпшення ситуації у галузі:

Підтримка та організація виробництва

- зміцнення систем безпеки в аеропортах та авіаційних компаніях, вдосконалення антитерористичних заходів;
- організація регулярних тренувань для персоналу та вдосконалення процедур перевірки пасажирів;
- інвестування у сучасні технології для вдосконалення процесів бронювання, обробки даних та автоматизації;
- впровадження онлайн-систем бронювання, використання штучного інтелекту для оптимізації планування маршрутів;
- підтримка досліджень та розвитку в області літакобудування, сприяння впровадженню екологічно чистих технологій;
- створення фонду для підтримки стартапів у галузі авіаційних технологій та стимулювання інноваційних проєктів;
- розробка гнучких тарифів та акцій для залучення пасажирів, реклама важливості безпеки та стабільності;
- впровадження сезонних знижок, проведення маркетингових кампаній з акцентом на безпеку;
- активне співробітництво з міжнародними авіакомпаніями та розробка нових міжнародних маршрутів;
- укладення угод про партнерство, участь у міжнародних конференціях для популяризації українського авіапростору.

Ці рекомендації враховують ключові виклики та можливості, з якими стикається пасажирська авіаційна галузь України в умовах воєнного стану, і можуть бути застосовані під час післявоєнної відбудови. Їх реалізація сприятиме стабільному розвитку, підвищенню конкурентоспроможності, а також поліпшенню якості обслуговування та безпеки пасажирів.

Фінансування. Дослідження виконано за кошти Національного фонду досліджень України (National Research Foundation of Ukraine) за проєктом НФДУ № 2023.04/0160, 0124U003748 «Розробка технології формування жаростійких покриттів плазмовим електролітичним окисдуванням на деталях авіаційної та ракетно-космічної техніки» (конкурс «Наука для зміцнення обороноздатності України»).

Список літератури

1. Exploring Dynamic Relationships Between Air Transportation and Economic Growth in South America / J. G. Brida, B. Lanzilotta, V. Segarra, S. Zapata // *Airlines and Developing Countries* / ed. by K. Button. – Leeds (UK): Emerald Publishing Limited, 2023. – Vol. 10. – Ch. 4. – P. 51–62.
2. A model to analyze the knowledge management risks in open innovation: proposition and application with the case of GOL Airlines / F. L. Oliva, A. C. T. Paza, J. L. Bution, M. Kotabe, P. Kelle, E. P. G. de Vasconcellos, C. C. de Hildebrand e Grisi, M. I. R. de Almeida, A. A. Fischmann // *Journal of Knowledge Management*. – 2021. – Vol. 26, No. 3. – P. 681–721.

Хвостак В. В.
аспірант, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Стадник С. О.
АО «Мотор Січ»,
м. Запоріжжя, Україна

МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МОЗАЙЧНИХ МЕТАЛЕВИХ БРОНЕЕЛЕМЕНТІВ У КОНСТРУКЦІЇ БРОНЕЖИЛЕТІВ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ПРОТИКУЛЬОВОГО ЗАХИСТУ

Сучасні бронежилети, що використовуються в правоохоронних органах та силових структурах, переважно складаються з багатошарових тканинних пакетів з високоміцних арамідних ниток та металевих бронеелементів. Проте в існуючих моделях тканинні та металеві шари недостатньо взаємодіють під час влучання кулі, що знижує ефективність захисту та призводить до збільшення ваги конструкції. Впровадження металевих бронеелементів мозаїчної конструкції може підвищити спільне гальмування кулі та зменшити вагу захисту.

Перед використовуваних нині в правоохоронних органах і військах моделей бронежилетів найбільш поширені такі, основу конструкції яких, окрім зовнішнього чохла, складають багатошаровий тканинний пакет із високоміцних арамідних ниток і металевий (найчастіше – сталевий) бронеелемент [1, 2], розташований з ударного боку, товщина якого визначається класом захисту бронежилета (рис. 1). З тильної сторони в якості амортизатора може використовуватися додатковий шар із легкого пористого матеріалу, наприклад, пінополіетилену.

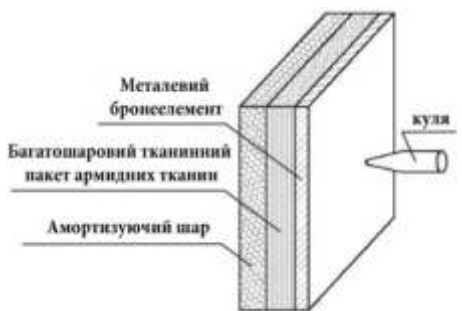


Рисунок 1 – Конструкція бронежилета протикульового захисту

Підтримка та організація виробництва

Таку конструкцію, зокрема, мають бронежилети 3, 4 і 5 класів.

Основні напрямки досліджень: вивчити можливості використання металевих бронеелементів мозаїчної конструкції в бронежилетах для підвищення рівня протикульового захисту та зменшення загальної маси виробу. Дослідити визначення форм та розмірів мозаїчних фрагментів, які забезпечують саму високу стійкість до пробиття при влучанні куль у різні ділянки бронеелемента.

Для проведення дослідження були використані наступні методи:

1. **Моделювання скінчених елементів:** у рамках дослідження проведено моделювання ударної взаємодії з використанням програмного комплексу LS-DYNA. Метод скінчених елементів застосовувався для аналізу деформації та руйнування мозаїчних бронеелементів під впливом високошвидкісних куль.
2. **Матеріали для моделювання:** у моделях використовувалися сталь марки 44 та алюмінієвий сплав Д16Т, що володіють високою міцністю та відносно низькою густиною. Вибір матеріалів був зумовлений їх широко застосовуваними захисними характеристиками.
3. **Вивчення параметрів форми та розмірів:** аналіз проводився для різних розмірів та форм мозаїчних фрагментів, щоб оцінити їх поведінку при влучанні куль у центральну частину та стики.

Дослідження підтверджують, що мозаїчна конструкція бронеелементів дозволяє досягти таких результатів:

1. **Підвищення стійкості до пробиття:** Оптимальні розміри квадратних фрагментів (12×12 мм) зі сталі товщиною 5 мм або алюмінію товщиною 14 мм демонструють високу стійкість до пробиття.
2. **Ефективність алюмінієвих фрагментів:** Застосування легкого алюмінієвого сплаву Д16Т дозволило збільшити товщину бронеелемента при збереженні ваги, що підвищує захист від високошвидкісних куль на 15–20% порівняно з традиційними бронежилетами.
3. **Стійкість до кутових ударів:** Моделювання показало, що фрагменти мозаїчної конструкції, особливо в алюмінієвому виконанні, знижують імовірність наскрізного пробиття кулі при влучанні в кут стиків між фрагментами.

Підтримка та організація виробництва

Отримані результати підтверджують, що використання мозаїчних металевих бронееlementів є перспективним для створення легких та ефективних бронежилетів, які можуть застосовуватися в силових структурах та правоохоронних органах. Застосування мозаїчної конструкції знижує масу виробу, а також підвищує стійкість до пробиття, що особливо важливо в умовах бойових дій. Перспективи подальших досліджень включають конструювання моделей шестигранних фрагментів та впровадження легких високоміцних алюмінієвих сплавів для додаткового підвищення міцнісних характеристик.

Список літератури

1. Zhang, X., & Wang, Y. (2013). Advancements in Lightweight Armor Materials. *Journal of Defense Materials*, 45, 112–120. Це джерело охоплює сучасні технології та матеріали, що використовуються у бронезахисних виробках, включаючи багатошарові арамідні волокна та металеві елементи.
2. Cunniff, P. M. (1999). Dimensionless Parameters for Optimization of Textile-Based Body Armor Systems. *Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics*, 1303–1310. Ця праця включає аналіз матеріалів, що використовуються в конструкції бронежилетів, і розглядає структуру, властивості та оптимальні матеріали для забезпечення необхідного рівня захисту.

УДК 621.99:622.243.24

Вуйціцка-Мигасюк Дорота
д-р техн. наук, професор, Люблінський
технологічний університет, м. Люблін, Польща

Готра Олександра
д-р техн. наук, професор,
Люблінський технологічний університет,
м. Люблін, Польща

Роп'як Л. Я.
д-р техн. наук, професор, Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, Україна

Гоголюк Л. В.
аспірант, Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, Україна

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ БУРИЛЬНИХ ТРУБ ІЗ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

Незважаючи на інтенсивний розвиток альтернативних джерел енергії, частка вуглеводнів продовжує залишатись ваговою в сумарному споживанні енергоносіїв у світі [1]. На тепер у зв'язку з вичерпанням ресурсів нафти і газу доводиться освоювати нові родовища на великих глибинах, застосовувати похило-горизонтальне або глибоководне буріння. Сучасні технології буріння потребують застосування альтернативних сталі матеріалів для виготовлення бурильних труб. Серед альтернативних сталі матеріалів найбільш економічно вигідним є застосування високоміцних деформівних алюмінієвих сплавів Д16 і 1953, які термічно зміцнюються, для виготовлення бурильних труб. Однією з головних переваг алюмінієвих бурильних труб є низька питома вага і більш висока питома міцність. Для підвищення надійності та довговічності алюмінієвих бурильних труб використовують конструкторські, експлуатаційні та технологічні методи.

До конструкторських методів покращення експлуатаційних властивостей бурового інструменту зазвичай відносять раціональний вибір матеріалів, проведення трибокорозійних випробовувань, варіювання геометрією інструментів [2] для підвищення їх міцності, жорсткості та герметичності нарізових з'єднань. Тут слід особливо

Підтримка та організація виробництва

виділити підходи спрямовані на прийняття найбільш оптимальних конструктивних рішень, зокрема, застосування методів оптимізації форми деталей на базі постановок віртуальних експериментів та комп'ютерного моделювання задля досягнення найкращого співвідношення ваги, міцності та потрібних експлуатаційних властивостей з урахуванням характеру навантаження та особливостей умов роботи інструментів.

Експлуатаційні методи передбачають аналіз та оптимізацію режимів роботи бурового обладнання і інструменту, включаючи швидкості та навантаження, температурні та гідравлічні режими тощо щоб мінімізувати зношування та продовжити життєвий цикл. Тут важливим є застосування інженерних рішень для зниження вібраційних навантажень [3]. Ефективним також є застосування спеціальних мастил, охолоджувальних та антикорозійних речовин для захисту інструментів від зносу та впливу агресивних середовищ і балансування.

До технологічних методів забезпечення високої зносостійкості бурових інструментів відносять застосування сучасного металорізального обладнання та різних методів обробки поверхні бурових інструментів, таких як механічна обробка різанням, фрикційна, тощо забезпечують надання поверхневим шарам робочих поверхонь деталей необхідної шорсткості, текстури та створення сприятливого напруженого стану, що підвищує їх втомну міцність та зносостійкість [4]. Також знаходять застосування різні методи формування покриттів, наприклад, плазмове електролітичне оксидування алюмінію [5] та комбіновані методи тощо.

Бурильні труби з алюмінієвих сплавів виготовляють збірними. Для з'єднання між собою алюмінієвих труб зазвичай використовують сталеві замки, муфти та ніпелі яких відповідно нагвинчують на їх різьбові кінці за гарячою посадкою. В результаті виконання операції складання відбувається місцеве нагрівання матеріалу замка та труби. У процесі буріння збірні алюмінієві бурильні труби піддаються тривалому нагріванню до температур ~ 150 °C та впливу корозійно-активного середовища промивних рідин та продукції нафтогазових родовищ з підвищеним вмістом сірководню. Тому розробка та обґрунтування практичних рекомендацій щодо технології виготовлення і складання та умов експлуатації бурильних труб з алюмінієвих сплавів є актуальним завданням, вирішення якого дозволить підвищити частку використання цих труб у нафтогазовидобувній галузі.

Список літератури

1. IEA World Energy Outlook. Flagship Report-2023, International Energy Agency: Paris, France, 2023. Available online:

<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023> (accessed on 30 September 2024).

2. Improving the aluminum drill pipes stability by optimizing the shape of protector thickening / Vlasiy O., Mazurenko V., Ropyak L. Rogal O. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2017. – Vol. 1. – No. (7–85). P. 25–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.65718>

3. Velichkovich A. Slotted shell resilient elements for drilling shock absorbers Velichkovich A., Dalyak T., Petryk I. // Oil and Gas Science and Technology, 2018. – Vol. 73. art. no. 2018043. <https://doi.org/10.2516/ogst/2018043>

4. Analytical Model of Tapered Thread Made by Turning from Different Machinability Workpieces / Onysko O., Kopei V., Barz C. et al. // Machines. 2024. Vol. 12. No. 5. art. no. 313. <https://doi.org/10.3390/machines12050313>

5. Optimization of Plasma Electrolytic Oxidation Technological Parameters of Deformed Aluminum Alloy D16T in Flowing Electrolyte / Ropyak L., Shihab T., Velychkovych A. et al. // Ceramics, 2023. – Vol. 6. – No. 1. – P. 146–167. <https://doi.org/10.3390/ceramics6010010>

Наукове електронне видання
Можна використовувати в локальному та мережному режимах

Тези доповідей Всеукраїнської науково-технічної конференції
студентів, аспірантів і молодих учених з міжнародною участю

**«Молодь в авіації: нові рішення та
перспективні технології»**

21–22 листопада 2024 р.

Один електронний оптичний диск (DVD-ROM); супровідна
документація. Тираж 100 прим. Зам. № 1417

Видавець і виготовлювач

Національний університет «Запорізька політехніка» Україна, 69063,
м. Запоріжжя, вул. Університетська, 64

Тел.: (061) 769–82–96, 220–12–14

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6952 від 22.10.2019