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



ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ

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

«Молодь в авіації: нові рішення та перспективні технології»

27–28 листопада 2025 р.

Електронне видання на CD-ROM

м. Запоріжжя, 2025

УДК 629.735
Т-299

Рекомендовано до видання Вченою радою Національного університету «Запорізька політехніка»
(Протокол № 6 від 23 грудня 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
Лазарєва 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, 27–28 листопада 2025 р. [Електронний ресурс] / Редкол. : Д. В. Павленко (відпов. ред.) Електрон. дані. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2025. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см. – Назва з тит. екрана. –165 с.

ISBN 978-617-529-522-9

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 978-617-529-522-9 © НУ «Запорізька політехніка», 2025

ЗМІСТ

Пленарне засідання

Шаповал А.С., Павленко Д.В.
РОЗРОБКА УНІВЕРСАЛЬНИХ ПАРАМЕТРИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТИПОВИХ КОМПОНЕНТІВ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ РОЗРАХУНКІВ 9
Шакало Р.Ю., Коваленко Ю.В., Занін О.Є., Лазарєва О.О.
ОСОБЛИВОСТІ КОЛИВАНЬ МОНОКОЛІС ТУРБІНИ ТА ВПЛИВ ВІДХИЛЕНЬ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ НА ЇХ ВЛАСНІ ЧАСТОТИ І ФОРМИ КОЛИВАНЬ 12
Войтович А.А., Дзюбик А.Р., Назар І.Б., Лампіцький О.С.
ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ НАПЛАВЛЕННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ШАРІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ 14
Ярема І.М., Дзюбик А.Р., Назар І.Б., Хомич І.Б., Гришин Г.Д.
ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ БПЛА ІЗ СПІНЕНИХ МАТЕРІАЛІВ 16
Mykhaylo Kybalnyy, Mykhailo Orlovskyi
INFLUENCE OF THE MAIN ROTOR VORTEX WAKE ON THE FLOWFIELD BEHIND A HELICOPTER WITH OPEN CARGO COMPARTMENT DOORS 18
Тесля С.Ю., Богомол Ю.І., Надтока В.М., Гусарова І.О.
ТЕРМОМЕХАНІЧНА СУМІНІСТЬ ФАЗ У БАГАТОШАРОВИХ ПОКРИТТЯХ ДЛЯ НЕОХОЛОДЖУВАНИХ КАМЕР ЗГОРАННЯ 20

Конструкція і міцність

Chernetsov V.M., Pavlenko D.V., Subbotin S.O.
PREDICTION OF AIRCRAFT ENGINE IGNITION PROCESS USING MACHINE LEARNING METHODS 22
Ціолковський К.О., Назар І.Б., Дзюбик А.Р., Войтович А.А.
ПРОБЛЕМА КУРСОВОЇ СТІЙКОСТІ БПЛА АЕРОДИНАМІЧНОЇ (КОМПОНУВАЛЬНОЇ) СХЕМИ «ЛІТАЮЧЕ КРИЛО» 24
Котов О.Б., Лівертовський М.І.
ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ БПАК В ЗИМОВИХ УМОВАХ 26
Котов О.Б., Семенов Є.В.
ЗАСТОСУВАННЯ БПЛА В УМОВАХ ЗЛЕДЕНІННЯ 28
Коноваленко Ю.А., Мітяєв О.А., Сохрякова І.М.
ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ ПОРШНІВ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ 31
Двірник Я.В., Єсауленко С.В.
АНАЛІЗ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ТРІЩИНИ В ТІЛО ДЕТАЛІ АВІАЦІЙНОГО ДВИГУНА 34

Вініченко В.С., Михайлов О.С.
ВПЛИВ РОБОЧОГО СЕРЕДОВИЩА НА ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНУ КОРОЗІЙНУ СТІЙКІСТЬ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБІННОЇ УСТАНОВКИ 36
Півень І.П.
КОНСТРУКТИВНІ ЗАХОДИ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ РАДІАЛЬНИХ ВАЛЬНИЦЬ ГТД МЕТОДИ ОЦІНКИ ПРУЖНИХ ТА МІЦНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ 37
Фасоляк А.В., Єршов А.М.
МЕТОДИ ОЦІНКИ ПРУЖНИХ ТА МІЦНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ 39
Mykhaylo Kybalnyy, Mykhailo Orlovskyi, Oleksii Prytula
MODELING OF AERODYNAMIC LOADS ON THE TAIL ROTOR OF A TRANSPORT HELICOPTER UNDER INTERFERENCE WITH THE MAIN ROTOR 41
Притула О., Пелих В., Пришко Ю.ОЦІНЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ ПЛАНУЮЧОГО ПОЛЬОТУ МОДИФІКОВАНОГО БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ 43
Mykhaylo Kybalnyy, Valentyn Pelykh, Olena Semeniuk, Yuliia Pryshko
METHODOLOGY OF ONE-WAY FSI-ANALYSIS OF AN AIRCRAFT WING 45
Savinov Serhii
BUCKLING OF A WEB UNDER TENSION AND SHEAR 47
Valentyn Pelykh, Mykhaylo Kybalnyy
VERIFICATION OF THE KINEMATIC SCHEME OF THE MI-8 HELICOPTER CONTROL SYSTEM (BOOSTER SECTION 49
Гвоздик Р.П., Бабенко О.М.
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОЖЛИВОСТІ СКИДАННЯ 100% НАВАНТАЖЕННЯ ГТД Д-336 ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ КЕРОВАНИХ КЛАПАНІВ ПЕРЕПУСКУ ПОВІТРЯ 51
Кішка І.Л., Головацький Т.Я.
ВСТАНОВЛЕННЯ НАПРУЖЕНЬ, ЩО ВИНИКАЮТЬ В КРИЛІ ПЛАНЕРА 53

Технологія виробництва і ремонту

Петров О.Д., Плівак О.А., Парненко В.С., Корбут Є.В.
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СВЕРДЛІННЯ ВУГЛЕПЛАСТИКІВ ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ РІЗАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СВЕРДЛА 55
Федосєєва В.О., Огнєв В.В., Матюхін А.Ю.
ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛОПАТКИ КОМПРЕСОРА НА ГВИНТОВОМУ ПРЕСІ 60
Дядя С.І., Яхно Д.А.
ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ВІБРАЦІЙ У ПРОЦЕСІ ФРЕЗЕРУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ 62

Чечет О.В., Куликовський Р.А., Чигілейчик С.Л.
ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПРИДАТНОСТІ ВІДНОВЛЕННЯ РОБОЧИХ ЛОПАТОК ГТД МЕТОДОМ МІКРОПЛАЗМОВОГО ПОРОШКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ СПЛАВОМ ЖС32-ВИ 64
Павленко Д.В., Таран В.О.
РОЗРОБЛЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВИБОРУ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ГАРЯЧОГО ТРАКТУ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ 66
Дядя С.І., Кононов В.В., Кононов Г.В.
ВПЛИВ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОЇ ОБРОБКИ НА ЯКІСТЬ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ 68
Лазарєв І. О., Сахнюк Н. В., Роп'як Л. Я.
ФОРМУВАННЯ НА АЛЮМІНІЇ ЖАРОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ ПЛАЗМОВИМ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИМ ОКСИДУВАННЯМ 69
Польнікова І.С.
ВИСОКОШВИДКІСНЕ ФРЕЗЕРУВАННЯ 71
Наумик О.О., Педаш О.О., Наумик В.В., Шаломєєв В.А.
ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛИТИХ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ АВІАЦІЙНОГО ТА ЕНЕРГЕТИЧНОГО МАШИНОБУДУВАННЯ ... 73
Наумик В.В., Кагановський О.Д., Качалов М.Б.
ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ВІДПОВІДАЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ НАЗЕМНИХ СИЛОВИХ АГРЕГАТІВ 75
Тищенко М.С., Тришин П.Р., Козлова О.Б.
ВАР'ЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ШПИНДЕЛЯ В УМОВАХ ВИНИКНЕННЯ АВТОКОЛИВАНЬ 76
Приходько О.С.
ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЯКОСТІ ТА СТАБІЛЬНОСТІ ПРОЦЕСУ ТОКАРНОЇ ОБРОБКИ 78
Павленко Д.В., Федоров І.А.
ФОРМУВАННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ТИТАНОВИХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ВИСОКОШВИДКІСНОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ ТА ВІБРОПОЛІРУВАННІ 80
Павленко Д.В., Котов О.Б. Семенов Є.В.
ЗАСТОСУВАННЯ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРА ГТД 83
Собченко С.В., Уланов С.О.
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ЛОПАТОК НАПРАВЛЯЮЧОГО АПАРАТУ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ 86

Івашків В.Р., Чучман М.Р., Омельченко С.А., Торба Ю.І., Неманежин Є.О.
ХІМІЧНЕ ПОЛІРУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ АВІАЦІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ 88
Лазарєва О.О., Лазарєв І.О., Сахнюк Н.В., Гембель В.Й., Пашечко М.І.
ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ КОНТАКТНИХ ПОВЕРХОНЬ ХВОСТОВИКІВ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРІВ ГТД 89
Василів Х.Б., Подобний О.В., Торба Ю.І., Неманежин Є.О.
ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ПОВЕРХНІ НА ВТОМНУ МІЦНІСТЬ СПЛАВУ ВТ8 91
Морозов А.В., Бойко І.А.
ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВЕ ЗВАРЮВАННЯ БАРАБАНІВ РОТОРІВ КОМПРЕСОРІВ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ 93
Герасимов В.О., Мікосянчик О.О., Герасимова О.В.
УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ МОДИФІКОВАНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ЗІ СПЛАВІВ ТИТАНУ В АВІАБУДУВАННІ 95
Квасницька К.Г., Нога В.О., Божко В.О, Квасницька Ю.Г.
РОЗРОБКА ЕКОЛОГІЧНОБЕЗПЕЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ КЕРАМІЧНИХ ОБОЛОНКОВИХ ФОРМ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ ВИЛИВКІВ 97
Уланов С.О., Качан О.Я., Назар І.Б.
ВПЛИВ СПОСОБІВ ЗМІЦНЕННЯ НА ГРАНИЦЮ ВИТРИВАЛОСТІ ДЕТАЛЕЙ ГТД 99
Lazarieva O., Prysyazhnyuk P., Ropyak L., Bembenek Michał
FIRST-PRINCIPLES ANALYSIS OF MECHANICAL AND ELECTRONIC PROPERTIES OF TERNARY Mo AND W BORIDES IN NICKEL SUPERALLOYS 101
Гребенніков М.О., Гончар Н.В.
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕЖИМІВ ВІБРОАБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ТИТАНОВИХ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРА 103
Бандура А.І., Роп'як Л.Я., Винар Т.В.
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ПОКРИТТІ, СФОРМОВАНОМУ НА АЛЮМІНІЇ ПЛАЗМОВИМ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИМ ОКСИДУВАННЯМ 108
Омельченко Ю.В., Уланов С.О.
ВПЛИВ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗМІЦНЕННЯ ЛОПАТОК ГТД 110
Колодій І.В., Савуляк М.В.
МОДЕРНІЗАЦІЯ ВІБРАЦІЙНОГО СТЕНДА ДЛЯ ВИПРОБОВУВАННЯ ВИРОБІВ АВІАЦІЙНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ 112
Свищ Т.В., Кльофа Р.А.
УДОСКОНАЛЕННЯ ЕКСЦЕНТРИКОВО-МАЯТНИКОВОГО ВІБРАЦІЙНОГО СТЕНДА ДЛЯ ВИПРОБОВУВАННЯ ВИРОБІВ АВІАЦІЙНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ 114

Капало Р.В., Веснін С.В.
РОЗРОБЛЕННЯ ВІБРАЦІЙНОГО СТЕНДА З ГІДРОМУФТОЮ ДЛЯ ВИПРОБОВУВАННЯ ВИРОБІВ АВІАЦІЙНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ 116
Яковлев О.В., Бабенко О.М.
МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ З ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ КОМПОЗИТНИХ КАБІН ПОВІТРЯНИХ СУДЕН 118

Матеріали авіаційного виробництва

Алексєєнко М.І., Акімов І.В.
ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ГРАФІТИЗОВАНИХ ЧАВУНІВ ДЛЯ ГАЛЬМІВНИХ СИСТЕМ ТРАНСПОРТНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ 120
Пучек С.В., Бєліков С.Б.
ВИВЧЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ЖАРОМІЦНОГО СПЛАВУ ЖС26-ВІ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВІДПОВІДАЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ ГТД 122
Дзюбик А.Р., Назар І.Б., Войтович А.А., Лампіцький О.С.
ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АУСТЕНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ У ЗВАРЮВАЛЬНИХ З'ЄДНАННЯХ АВІАЦІЙНІЙ ДЕТАЛЕЙ 123
Лівертовський М.І., Котов О.Б., Павленко Д.В.
ФОРМУВАННЯ СУБМІКРОКРИСТАЛІЧНОЇ СТРУКТУРИ В ТИТАНОВИХ СПЛАВАХ МЕТОДОМ ІНТЕНСИВНОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ 125
Акімов І.В., Неводніч М.М.
ВПЛИВ МОДИФІКУВАННЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ НІКЕЛЕВИХ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ 127
Харченко А.О., Міщенко В.Г.
ОСОБЛИВОСТІ ОПОРУ МАТЕРІАЛІВ НАДВИСОКОШВИДКІСНІЙ ДЕФОРМАЦІЇ ТА РУЙНУВАННЯ 129
Хвостак В.В., Стадник С.О.
ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ДЕФОРМАЦІЇ ТА ПОПЕРЕЧНОГО СТИСНЕННЯ НА МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕКСТИЛЬНИХ І КОМПОЗИТНИХ БРОНЕМАТЕРІАЛІВ 130
Корнієнко В.В., Євсєєва Н.О.
РОЗВІТОК РУЙНУВАННЯ ВНУТРІШНЬОЇ ПОВЕРХНІ РЕАКТОРІВ У ПРОЦЕСІ МАГНІЄТЕРМІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА ТИТАНУ 133
Бєліков С.Б., Міщенко Д.В.
ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ НИЗЬКО ВУГЛЕЦЕВОЇ ЦЕМЕНТОВАНОЇ СТАЛІ 136

Кононенко А.В., Кононенко Ю.І., Матюхін А.Ю., Скребцов А.А., Малкіна О.В.
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН ДЕГРАДАЦІЇ СПЕЧЕНИХ ЗАГОТОВОК ІЗ СУМІШІ ПОРОШКІВ ТИТАН-ГІДРОКСИАПАТИТ. 138
Мордюк Б.М., Малінін В.Ю., Роп'як Л.Я.
ВЛАСТИВОСТІ ПОКРИТТІВ, СФОРМОВАНИХ ПЛАЗМОВИМ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИМ ОКСИДУВАННЯМ, НА СПЛАВІ Д16Т ПІСЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО УДАРНОГО ОБРОБЛЕННЯ 141

Авіоніка та радіотехнічні системи

Малий О.Ю., Вичужаніна С.А., Піроженко О.О., Онищенко В.Ф.
МЕТОДИКА РЕАЛІЗАЦІЇ ПРИЙМАЧА СИГНАЛІВ LORA НА ОСНОВІ SDR HACKRF ONE ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМНОГО ІНСТРУМЕНТАРІЮ GNU RADIO 143
Малий О.Ю., Піроженко О.О., Вичужаніна С. А., Онищенко В.Ф.
СИСТЕМА ВИЯВЛЕННЯ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ НА БАЗІ SDR З ВИКОРИСТАННЯМ ЧАСТОТНО МОДУЛЬОВАНИХ СИГНАЛІВ 145
Бугрова Т.І., Бугров О.Є.
МЕРЕЖА АКУСТИЧНОЇ ФІКСАЦІЇ УДАРНИХ ДРОНІВ МЕТОДОМ ТРИАНГУЛЯЦІЇ 147
Хобот Н.П.
НАЗЕМНА СТАНЦІЯ КЕРУВАННЯ ДРОНАМИ «ЖИРАФА» ……148
Хобот Н.П.
ПОСТАНОВНИК АКТИВНИХ ШУМОВИХ ЗАВАД «ЇЖАК» 150
Хобот Н.П.
ДЕТЕКТОР (СКАНЕР) ВІДЕОСИГНАЛУ З FPV-ДРОНІВ «ЯСТРУБ» …..152

Підтримка та організація виробництва

Кіндрачук О.С., Максимович О.В.
ЦИФРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ АЕРОПОРТУ ІВАНО-ФРАНКІВСЬК ДЛЯ АВІАЦІЙНОГО СИМУЛЯТОРА X-PLANE 12 У WORLDEDITOR 3D 154
Артьомов А.І., Артьомов І.В.
ІТ ДЛЯ ПЛАНУВАННЯ МАРШРУТІВ РОБОТИЗОВАНИХ СИСТЕМ У АПК. 156
Лебедєва О.В., Цибуля Н.О.
ФОРМУВАННЯКУЛЬТУРИ ВНУТРІШНІХ КОМУНІКАЦІЙ НА АВІАЦІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ: ВИКЛИКИ ГЕНДЕРНОЇ РІВНОСТІ ТА ТРАНСФОРМАЦІЯ ЕТИЧНИХ СТАНДАРТІВ. 158
Табунщик Г.В., Шитікова О.В.
ФОРМУВАННЯ ЗВЕДЕНИХ ПРОТОКОЛІВ ВИПРОБУВАНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ 161
Новіков М.А.
СТРАТЕГІЧНИЙ ФОРСАЙТИНГ – ІНСТРУМЕНТ ЕФЕКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ПІДПРИЄМСТВАМИ АВІАЦІЙНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ 163

УДК 621.438:519.876.5

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 УНІВЕРСАЛЬНИХ ПАРАМЕТРИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТИПОВИХ КОМПОНЕНТІВ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ОПОТИМІЗАЦІЙНИХ РОЗРАХУНКІВ

У наш час сучасні оптимізаційні комплекси знайшли широке застосування у різних галузях науки і техніки. У авіадвигунобудуванні їх застосовують на різних етапах проектування від оптимізації окремих компонентів під час проведення одномірних проектувальних розрахунків [1], [2] до пошуку оптимальних рішень при проведенні складних багатодисциплінарних розрахунків [3].

Оскільки сучасні оптимізаційні комплекси – це складні математичні інструменти, то і якість результатів, отриманих з їх допомогою, напряму залежить від якісного налаштування оптимізаційної задачі, розробки правильної параметричної моделі об’єкта або об’єктів, що досліджується, підбору комбінації змінних параметрів і цільових функцій, задання коректних діапазонів змінних параметрів і так далі.

При розробці параметричних моделей особливу увагу слід звернути на кількість змінних параметрів і цільових функцій у моделі. Оптимізаційні комплекси дуже чутливі до великої кількості змінних параметрів, а також взаємопов’язаних цільових функцій. Якщо ця кількість досягає рівня, критичного для даного оптимізаційного алгоритму, то з’являється так званий «шум», який заважає отриманню дійсно оптимальної комбінації параметрів [3], [4]. Тому проблема розробки якісної параметричної моделі є дуже актуальною при вирішенні оптимізаційних задач будь якої складності.

При проектуванні газотурбінних двигунів (ГТД) розробка параметричних моделей його компонентів ускладняється тим, що різні програмні комплекси для розрахунків можуть використовувати різний набір вхідних даних для розрахунків. Тому у різних авторів, що займаються задачами оптимізації компонентів ГТД зазвичай використовуються різні параметричні моделі компонентів, що специфічні для конкретної задачі [1], [2]. А деякі дослідники навіть розробляють новий комплекс одномірних розрахунків для вирішення конкретної оптимізаційної задачі [5].

В даній роботі зроблена спроба розробки універсальних параметричних моделей компонентів ГТД, які б можна було застосовувати для вирішення

оптимізаційних задач різної складності і які можна застосовувати з різними програмними комплексами для одномірних розрахунків.

Для цього було розглянуто типові компоненти ГТД: ступінь осьового вентилятора, ступінь осьового компресора, ступінь радіального компресора і ступінь осьової турбіни. Для кожного компонента складено список параметрів, які дозволяють визначити радіальні розміри проточної частини, а також характеристики лопаткових вінців цього компонента. Наприклад, для ступені осьової турбіни – це радіальні розміри на вході і виході із соплового апарата, радіальні розміри на вході і виході із робочого колеса, кількість лопаток, хорди і лопаткові кути статора і ротора. Далі складено список обмежуючих параметрів, що дозволять контролювати «реальність» комбінації параметрів при оптимізації (наприклад різниця між радіальнім розміром на втулці виходу із соплового апарата і входом у робоче колесо, щоб унеможливити зворотні уступи проточної частини). Після цього було проаналізовано отримані списки і виконано зменшення кількості вхідних і обмежуючих параметрів шляхом заміни декількох параметрів на один більш універсальний.

В результаті проведеної роботи вдалось значно скоротити необхідну кількість параметрів для моделі кожного компонента ГТД, отримати більш якісні параметричні моделі, розробити моделі осьових ступенів, що можуть використовуватись для оптимізації як окремий елемент (одноступеневий компонент), а також у складі кількох аналогічних елементів (багатоступеневий компонент). При чому, для багатоступеневого компонента вдалося значно зменшити необхідну сумарну кількість параметрів, що дозволить використовувати розроблені моделі для модулів з підвищеною кількістю компонентів (наприклад, багатоступеневий осьовий компресор з кількістю ступенів більше 10).

Крім того запропоновано можливі шляхи по інтеграції розроблених моделей у різні типи розрахункових комплексів, що робить їх по справжньому універсальними.

Розроблені моделі планується використовувати для постановки і вирішення оптимізаційних задач підвищеної складності, як, наприклад, оптимізація кількох компонентів ГТД одночасно.

Список літератури

1. Preliminary Multi-Disciplinary Optimization in Turbomachinery Design. / Panchenko, Y.; Moustapha, H.; Mah, S.; Patel, K.; Dowhan

2. 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

3. Adaptive Range Multi-objective Genetic Algorithm and Self Organizing Map for Multi-objective Optimization Problems / Sasaki S. and Obayashi S., 2004./ In Optimization Methods for Multicriteria/multidisciplinary Design Applications to Aeronautics and Turbomachinery, VKI-LS-2004-7

4. Бакуменко Н.С. Оптимизация многоэкстремальных функций с помощью генетического алгоритма с модифицированным оператором мутации / Системи обробки інформації: Зб. наук. праць. – Харків: Харківський військовий університет, 2004. – Вип. 9. – С. 13–16.

5. A Tool for the Design of Turbomachinery Disks for an Aero-Engine Preliminary Design Framework. / Kolias, I.; Aretakis, N.; Alexiou, A.; Mathioudakis, K. Aerospace 2023, 10, 460.

УДК 621.45-253:534.1:621.753

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

Коваленко Ю. В.
Провідний інженер-дослідник експериментально-випробувального комплексу, сектору міцності АТ «Івченко-Прогрес»,
м. Запоріжжя, Україна

Занін О. Є.
провідний інженер, АТ «Івченко-Прогрес»,
м. Запоріжжя, Україна

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

ОСОБЛИВОСТІ КОЛИВАНЬ МОНОКОЛІС ТУРБІНИ ТА ВПЛИВ ВІДХИЛЕНЬ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ НА ЇХ ВЛАСНІ ЧАСТОТИ І ФОРМИ КОЛИВАНЬ

Перехід від традиційних колес компресорів і турбін до моноколес дозволяє знизити собівартість авіаційних газотурбінних двигунів. Однак моноколеса турбіни, що виготовляються методом лиття по виплавлюваних моделях, мають більші виробничі відхилення порівняно з моноколесами компресора. Ці відхилення призводять до різночастотності у моноколесі, що впливає на його роботоздатність.

Мета роботи – встановлення особливостей коливання моноколіс турбіни та визначення впливу виробничих відхилень на їх власні частоти і форми коливань експериментальним та розрахунковим методами.

Для досягнення поставленої мети використано комплексний підхід:

3D-сканування виготовленого моноколеса за допомогою сканера Atos Core 300 з точністю до 0,03 мм;

Розрахункове моделювання номінальної циклосимметричної моделі (845874 вузлів, 319783 елементів) та повної моделі з урахуванням виробничих відхилень (794784 вузлів, 380485 елементів);

Експериментальне визначення власних частот методом вимушених коливань у діапазоні 2500-6000 Гц з використанням вібродатчика, п'єзощупа та мікрофона.

Визначено шість найбільш інтенсивних форм коливань моноколеса. Частоти робочих лопаток за першою згинною формою знаходяться в діапазоні 4375-4651 Гц. Виявлено наступні типи коливань: з двома вузловими

діаметрами (веєрні коливання), парасолькові коливання та коливання з кількома вузловими діаметрами і колами.

Порівняння результатів показало як збіжність, так і розбіжності розрахункових та експериментальних частот. Зокрема, для першої форми отримано: номінальна модель – 2916 Гц, модель з відхиленнями – 2877 Гц, експеримент – 2940 Гц. Розбіжності пояснюються неврахуванням у розрахункових моделях багатьох реальних властивостей деталей, включаючи розподіл мас, жорсткість та граничні умови.

За результатами дослідження запропоновано:

- Впровадження операції періодичного контролю за власними частотами та формами коливань моноколіс турбін з використанням спектрального та розрахунково-дослідницького методу;
- Використання спектру моноколеса, виготовленого згідно з технічними вимогами, як еталонного для порівняльного аналізу;
- Проведення оцінювання не менше ніж за шістьма найбільш інтенсивними формами коливань;
- Застосування запропонованої методики для моноколіс, що знаходяться в експлуатації на допоміжних силових установках при міжресурсному ремонті.

Висновки:

- Характерні особливості коливань моноколіс турбіни, виготовлених методом лиття, включають асиметрію форм коливань зі зміщенням вузлових діаметрів, що принципово відрізняє реальні конструкції від ідеалізованих розрахункових моделей.
- Виробничі відхилення значно впливають на динамічні характеристики моноколіс.
- Для більш повної та об'єктивної оцінки придатності моноколіс рекомендується доповнити традиційні методи контролю дослідженням власних частот і форм коливань з порівняльним аналізом розрахункових даних.
- Запропонована методика періодичного контролю за власними частотами і формами коливань дозволяє приймати обґрунтовані рішення про придатність як нових виготовлених, так і експлуатованих моноколіс без їх руйнівного контролю.

УДК 629.7.07, 621.791.92

Войтович А. А.
канд. наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

Дзюбик А. Р.
канд. наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

Назар І. Б.
канд. наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

Лампіцький О. С.
аспірант, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ НАПЛАВЛЕННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ШАРІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Відомо, що від параметрів режиму наплавлення залежить перемішування наплавленого металу із металом основи. Збільшений коефіцієнт перемішування призводить до зростання частки основного металу основи в наплавленому металі, тобто зміни прогнозованого хімічного складу шва, часто зниження його твердості та зносостійкості. Для оптимізації режимів наплавлення під шаром флюсу виконано математичне планування експерименту.

Вибрали мінімальну кількість параметрів, тобто число факторів для плану експерименту склало m = 2: струм та швидкість зварювання. Проведений попередній аналіз їх можливої зміни в процесі наплавлення дав змогу встановити граничні межі. При цьому дослідження цих факторів на двох рівнях показує, що повна кількість експериментів складає. Планування експерименту виконувалося у відповідності до рекомендацій літератури [1, 2].

Представлений повнофакторний експеримент рівномірно охоплює все поле досліджень, а також виключається можливість повторення парних сполучень факторів. У табл. 1 наведено оцінку можливості впливу основних параметрів режиму на контрольовані параметри шва.

Кількість вимірювань експериментальних даних при визначенні параметрів забезпечувала статистичну обробку з довірчою ймовірністю 0,95. У нашому випадку планування здійснювалось без врахування ефекту взаємовпливу, оскільки фактори, а саме: струм та швидкість зварювання, є взаємо незалежними.

Таблиця 1 – Фактори наплавлення та інтервали їх зміни

Фактор	Познач. фактора	Рівні факторів			Інтервал зміни, Δxi
		нижній, -1	основни, 0	верхній, +1	
Струм зварювання, А	X_1	380	420	460	40
Швидкість зварювання, м/год	X_2	13	18,5	24	5,5

Кількість вимірювань експериментальних даних при визначенні параметрів забезпечувала статистичну обробку з довірчою ймовірністю 0,95. У нашому випадку планування здійснювалось без врахування ефекту взаємовпливу, оскільки фактори, а саме: струм та швидкість зварювання, є взаємо незалежними.

В якості функцій відгуку у кожній серії експериментів прийнято характеристичні коефіцієнти наплавленого валика

- підсилення

$$\Psi = e/g \quad (1)$$

де e – висота підсилення, g – ширини підсилення,

- форма шва

$$\gamma = e/h \quad (2)$$

де h – глибина проплавлення, e–висота підсилення.

Висновок. За результатами планування експерименту визначено оптимальні параметри режиму зварювання одного валика для розглядуваних умов технологічного процесу. Зокрема, наступні дослідження реалізувалися при струмі зварювання 420 А; швидкості зварювання 22 м/год та напрузі дуги 32 В.

Список літератури

1. Особливості формування та руйнування наплавлених шарів з порошкових дротів системи Fe-Cr-B-C за ударних навантажень / А. А. Войтович, Г. В. Похмурська, М. М. Студент, О. З. Студент // Проблеми трибології. 2015. – 78, №4. – С. 105–113.

2. Похмурська Г В. Ударно-абразивне зношування поверхневих шарів, наплавлених порошковими дротами системи Fe-Cr-B-C / Г. В.Похмурська, А. А. Войтович // Науковий вісник НЛТУ України. – 2015. – № 25.3. – С. 129–135.

УДК 629.735.015.23:678.742.2

Ярема І. М.
студент, Національний університет «Львівська політехніка»,
м. Львів, Україна

Дзюбик А.Р.
канд. наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка»,
м. Львів, Україна

Назар І. Б.
канд. наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», м.
Львів, Україна

Хомич І. Б.
старший викладач, Національний університет «Львівська політехніка»,
м. Львів, Україна

Гришин Г.Д.
студент, Національний університет «Львівська політехніка»,
м. Львів, Україна

ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ БПЛА ІЗ СПІНЕНИХ МАТЕРІАЛІВ

Застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у сучасних бойових діях підтвердило їхню високу ефективність. Створення спеціалізованих підрозділів безпілотних систем свідчить про зростання ролі цього класу літальних апаратів (ЛА) у забезпеченні обороноздатності держави [1].

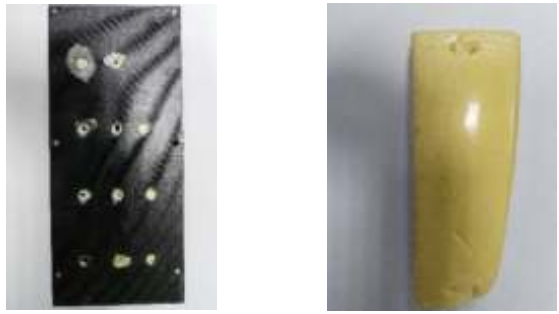
Одним із пріоритетних напрямів розвитку є масштабування виробництва БПЛА та впровадження технологій, придатних для масового виготовлення. Такі технології повинні забезпечувати високу швидкість виробництва, мінімізацію витрат та відповідність технічним вимогам замовника.

Одним із перспективних методів є екструзійний 3D-друк [2], який широко використовується у різних галузях промисловості. Ця технологія дає змогу отримати точну геометрію елементів БПЛА та забезпечити повторюваність виробів. Проте наявність дороговартісного обладнання та тривалий час виготовлення [3] істотно обмежують її використання для масового виробництва.

Як альтернативу досліджено технологію виготовлення елементів БПЛА із спінених полімерних матеріалів. До її переваг належать простота виконання, низька вартість матеріалів і відсутність потреби у спеціалізованому обладнанні.

Елементи конструкції БПЛА отримували шляхом заповнення форми піноутворюючим матеріалом (рис. 1*а*). Використано спінюючий матеріал на

основі поліуретану SOUDAL. Кількість внесеного матеріалу контролювали ваговим методом. Щоб уникнути склеювання матеріалу з формою та забезпечити легке вилучення готової деталі, внутрішні поверхні форми обробляли рідким силіконом. Для прискорення процесу затвердіння поверхню форми попередньо зволожували. Після заповнення форма стискалася струбцинами для запобігання деформації під час спінення.



а *б*

Рисунок 1 – *а* – форма для виготовлення елемента БПЛА крило;
б – крило елемент БПЛА

Технологічний процес термообробки відбувався при температурі 50 °С упродовж 1,5 год. У результаті отримано дослідний зразок елемента крила БПЛА (рис. 1*б*).

Висновки. Проведені експериментальні дослідження підтвердили можливість виготовлення елементів конструкції БПЛА із спіненого поліуретанового матеріалу SOUDAL. Запропонована технологія може бути використана для масового виробництва завдяки простоті виконання, низькій собівартості та відсутності необхідності у високовартісному обладнанні.

Список літератури

1. Безпілотні літальні апарати та їхній вплив на перебіг російсько-української війни / Медведєв В. К., Коренівська І. С., Хажанець Ю. А., Салов А. О. // Наука і оборона. – 2023. – № 2. – С. 52–59. https://doi.org/10.33099/2618-1614-2023-22-2-52-59

2. Мікульонок, І. О. Технологія перероблення полімерів [Електронний ресурс] : підруч. для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальностями «Прикладна механіка», «Галузеве машинобудування» / І. О. Мікульонок ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 5-те вид., переробл. та доповн. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,00 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 314 с.

3. Material extrusion–based multi-material 3D printing: a holistic review of recent advances. / Rajeshirke, M., Fidan, I., Naikwadi, V. et al. // Int J Adv Manuf Technol 139, 149–174 (2025). https://doi.org/10.1007/s00170-025-15920-1

UDC 629:735.33

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

Mykhailo Orlovskyi
PhD, Associate Professor, National Aerospace University “KHAI”,
Kharkiv, Ukraine

INFLUENCE OF THE MAIN ROTOR VORTEX WAKE ON THE FLOWFIELD BEHIND A HELICOPTER WITH OPEN CARGO COMPARTMENT DOORS

Air delivery of cargo, equipment and personnel is one of the important scenarios for the use of the Mi-8 type helicopter [1]. Safe and accurate airdrop of cargo and personnel requires a deep understanding of the physics of flow for the appropriate flight conditions and helicopter configuration. Currently, the tools to improve this understanding are limited to experimental and numerical methods [2–3]. Computational fluid dynamic (CFD) methods allow making valuable predictions of these conditions, taking into account the influence of the both main and tail rotors, the spatial position of the airframe, open cargo cabin doors, open ramp, etc. [2–3].

With the requirements of accurate airdrop of personnel and/or equipment to an area of limited size, while ensuring safe conditions for the helicopter itself, as well as paratroopers and equipment/cargo, the military transport helicopter poses unique challenges for computational fluid dynamic. Among them: ensuring the safety of paratroopers, whose trajectory near the helicopter significantly depends on the helicopter's wake, which creates significant turbulence (the so-called "safe separation" problem [3]) and ensuring safe operating conditions inside the cargo cabin, while open ramp significantly affect the internal airflow.

As part of this work, a study of the flow in the vicinity of the aft part of the Mi-8 type helicopter with open cargo doors and under the influence of the vortex wake of the main rotor was carried out.

The flow in the aft part of the Mi-8 type helicopter is determined by a complex system of vortices caused by the shape and inclination of the lower part of the fuselage in the area of the beginning of the tail boom. With the cargo ramp open and the cargo doors open, additional areas with massive flow separation appear, which increases the complexity of these phenomena (Fig. 1). In addition, the strong, poorly predicted effect of the main rotor sometimes radically changes the entire flow pattern as a whole. This situation is a serious challenge for any RANS solver. In this study, a hybrid rotor model was used, based on an improved approach of the blade element method (BEM). This approach allowed to simulate the complex geometry of the

surrounding and internal space of the helicopter, taking into account the influence of the main rotor vortex wake, significantly reducing computational resources.

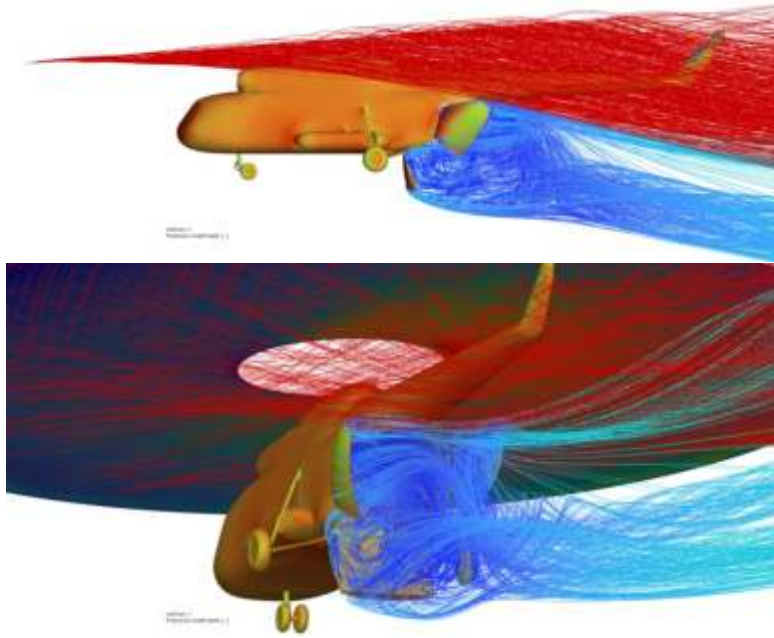


Figure 1 – Vortex structure in the aft part of the helicopter with the cargo doors and ramp open

References

1. Danilov, V. A. Mi-8 helicopter. Device and Maintenance (Moscow: “Transport” Publisher) p. 278, 1988 (in Russian)

2. Johnson III, W., Trickey, Ch., Forsythe, J., Albertson, J., Leigh, E., “Experimental and Computational Investigation of the Flow behind a C-130 with Tailgate Down, AIAA 2002-0713, 2002

3. Serrano, M., Leigh, E., Johnson III, W., Forsythe, J. R., Morton, S. A., Squires, K. D., “Computational Aerodynamics of the C-130 in Airdrop Configurations”, AIAA 2003-0229, 2003

УДК 667.6

Тесля С. Ю.
PhD, КПІ ім. Ігоря Сікорського
м. Київ, Україна

Богомол Ю. І.
д-р техн. наук, професор, член-кореспондент НАН України,
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

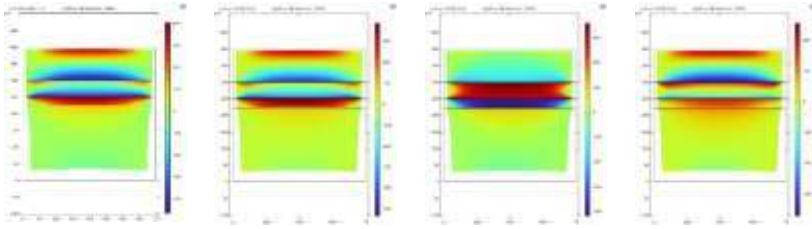
Надтока В. М.
канд. техн. наук, зав. відділу
Конструкторське бюро "Південне" ім. М.К. Янгеля,
м. Дніпро, Україна

Гусарова І. О.
пров. наук. співроб., д-р техн. наук
Конструкторське бюро "Південне" ім. М.К. Янгеля,
м. Дніпро, Україна

ТЕРМОМЕХАНІЧНА СУМІНІСТЬ ФАЗ У БАГАТОШАРОВИХ ПОКРИТТЯХ ДЛЯ НЕОХОЛОДЖУВАНИХ КАМЕР ЗГОРАННЯ

Сучасний розвиток авіа- ракетобудування ставить нові вимоги щодо матеріалів для реактивних та турбореактивних двигунів. Для досягнення високої надійності, довговічності та стабільності роботи двигунів, однією з умов є висока термічна та окисна стійкість, як робочих частин, так і елементів не охолоджуваних корпусів. Одним з варіантів підвищення термічної стійкості даних частин є нанесення захисних покриттів на основі тугоплавких сполук [1]. Однофазні покриття за рахунок значних відмінностей в коефіцієнтах термічного розширення (к.т.р.) використовуються досить рідко, тому застосовуються багатошарові покриття. Першим шаром покриття наноситься демпферний металевий шар, для збільшення адгезії та зниження різниці к. т. р, другий шар бар'єрний зазвичай на основі боридів, для уникнення дифузійних процесів в покриттів під час нагрівання, третій захисний шар на основі силіцидів з метою отримання високої окисної стійкості. В даному дослідженні проведено аналіз поля напружень методом скінченних елементів в багатошаровому покриттів на основі $MeSi_2$-TiB_2-Me(Cr, Mo, Nb, Ti) під час охолодження від 1000 °С до 20 °С. Товщина демпферного покриття – 30 мкм, бар'єрного – 50 мкм, захисного – 100 мкм. Оцінку термомеханічних процесів проводили в середовищі Comsol на лінійній моделі за стаціонарних умов. Матеріал основи обрано жароміцний сплав Inconel 718. Композиції $MoSi_2$-TiB_2-Cr, $MoSi_2$-TiB_2-Ti (рис. 1*а*, *б*) демонструють виникнення високих напружень в області демпферного та бар'єрного шарів (близько 400 МПа), що може призвести до відшарування та утворення тріщин. Для покриття $MoSi_2$-

TiB_2-Mo (рис. 1*в*) відмічається локалізація розтягувальних напружень в області бар'єрного шару (величина напружень складає близько 350 МПа). Формування області з високими нормальними та тангенціальними напруженнями призводить до утворення в центральному шарі покриття складного напружено-деформованого стану, який супроводжуватиметься розшаруванням. Найвища однорідність механічного поля напруг отримано в $MoSi_2$- TiB_2-Nb (рис. 1*г*). В кожному з шарів присутні локальні явища накопичення напружень, але за рахунок розподілу по об'єму варто очікувати високої стабільності роботи даної системи.



а *б* *в* *г*

Рисунок 1 – Зміна полів напружень в покритті під час охолодження з 1000 °С (*а* – $MoSi_2$-TiB_2-Cr; *б* – $MoSi_2$-TiB_2-Ti; *в* – $MoSi_2$-TiB_2-Mo; *г* – $MoSi_2$- TiB_2-Nb)

Відомості про фінансування дослідження. Робота виконана за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України (проєкт 2025.06/0079)

Список літератури

1. Microstructure and high-temperature oxidation behaviour of $MoSi_2$ protective coatings on Mo-based combustion chamber in rocket engines / E. Szajna, G. Moskal, W. Stryczniewicz [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2023. – P. 129896. URL: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129896

УДК 629.7.036.04:004.85:519.876

Chernetsov V. M.,
PhD student, National University Zaporizhzhia Polytechnic
Zaporizhzhia, Ukraine

Pavlenko D. V.
Doctor of Technical Sciences, Professor,
National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine

Subbotin S. O.
Doctor of Technical Sciences, Professor,
National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine

PREDICTION OF AIRCRAFT ENGINE IGNITION PROCESS USING MACHINE LEARNING METHODS

Reliable ignition is one of the key factors which guarantees safe and stable operation of aircraft engines on various operation modes. The efficiency of engine startup depends on parameters of device called “igniter”, like: its geometric characteristics, environmental conditions and intake fuel temperature and pressure. Traditional approaches of igniter performance evaluation rely on full-scale experimental testing, which is time consuming and cannot fully represent the entire range of operation modes.

The goal of the research is to create and compare various machine learning models that can predict the probability of successful engine ignition under given external and internal conditions. The research was based on experimental dataset obtained during engine bench tests at “Ivchenko-Progress”.

For binary classification (“ignites” or “does not ignites”), several machine learning algorithms were applied: Logistic Regression, Decision Tree, Support Vector Machine, Random Forest, Gaussian Naive Bayes (GaussianNB), k-Nearest Neighbors, as well as neural networks such as Multylayer Perceptron (MLP) and Convolution Neural Network (CNN). The data were preprocessed, normalized, and outliers removed. Various combinations of cross-validation and regularization were applied to prevent overfitting and improve generalization for some of shallow models.

The comparative analysis showed that the Random Forest model demonstrated the highest classification accuracy (Accuracy = 0.92, F1-score = 0.91) and the lowest mean absolute error (MAE = 0.08). The SVM model exhibited stable performance under various hyperparameter settings, while GaussianNB and CNN showed lower prediction ability. Feature importance analysis confirmed that the pressure difference in the channel (ΔP_{kk}), fuel temperature, and torch temperature had the greatest impact on the ignition result. Figure 1 illustrates accuracy comparison among different models.

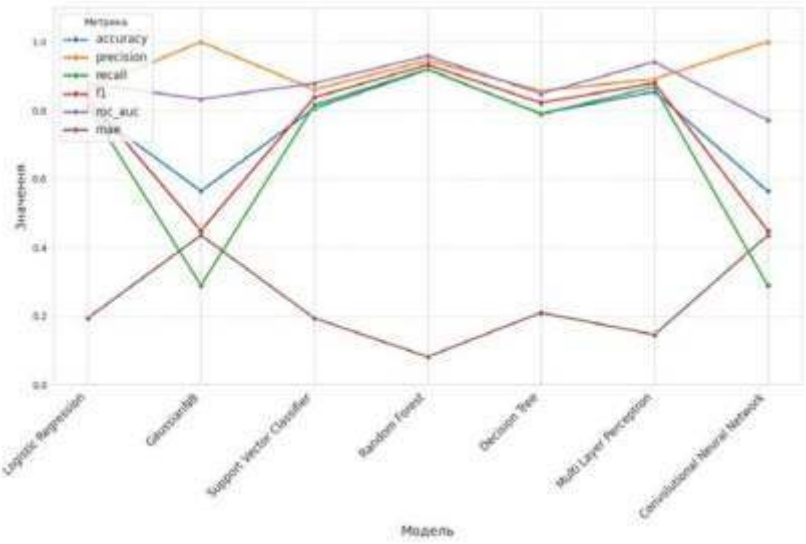


Figure 1 – Comparison of accuracy metrics among different machine learning models

The obtained results show that the proposed approach can be integrated into digital decision-support systems during aircraft engine design. This will reduce the number of physical experiments and increase diagnostic accuracy.

УДК 629.7.05

Ціолковський К. О.
студент, Національний університет “Львівська політехніка”

Назар І. Б.
канд. наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

Дзюбик А. Р.
канд. наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

Войтович А. А.
канд. наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка»,м. Львів, Україна

ПРОБЛЕМА КУРСОВОЇ СТІЙКОСТІ БПЛА АЕРОДИНАМІЧНОЇ (КОМПОНУВАЛЬНОЇ) СХЕМИ “ЛІТАЮЧЕ КРИЛО”

Практика застосування БПЛА у сучасних бойових діях показала їхню високу ефективність [3]. Однією з найпопулярніших аеродинамічних схем нині є «літаюче крило». Такий вибір пов’язаний із високою аеродинамічною ефективністю цієї схеми завдяки суттєвому зниженню лобового опору [2]. Водночас авіація — це світ компромісів: виграючи в одному, програємо в іншому. У випадку з «літаючим крилом» ми отримуємо менший опір, але поступаємося маневреністю, курсовою стійкістю та надійністю [1,2].

Однією з основних проблем аеродинамічної схеми «літаюче крило» є зменшення курсової стійкості через відсутність хвостового оперення. Унаслідок зниженої напрямної стійкості посилюється зв’язок каналів ривок–крен і з’являється схильність до «голландського кроку» (lateral-directional Dutch roll) [4]. Тому для керування курсом у літаючих крилах часто застосовують drag-rudders на закінцівках, вертикальні поверхні/вінглети або гібридні керуючі поверхні, наприклад елевони (керуючі поверхні, що поєднують функції елеронів і керма висоти). Додатково або альтернативно залучають диференційну тягу (особливо в схемах із розподіленою електричною рушійною установкою), що дає змогу формувати керуючий момент по курсу без вертикального оперення. На практиці такі рішення поєднують із активними системами демпфування в складі електродистанційного керування (FBW) для приглушення «голландського кроку» та підтримання прийнятних характеристик пілотажності.

Для забезпечення курсової стійкості зараз використовують різні підходи. Зокрема, перспективним напрямом є використання адаптивних систем автоматичного керування, здатних у реальному часі змінювати параметри

демпфування та компенсувати відхилення за курсом на основі даних інерціальних датчиків і гіроскопів. Також ефективним рішенням може бути застосування активних аеродинамічних поверхонь змінної геометрії, що автоматично регулюють локальний опір або підйомну силу на закінцівках крила [2,5]. У конструктивному плані підвищення стійкості досягається за рахунок зміни розподілу підйомної сили (наприклад, використання зворотного звуження або S-подібного профілю), встановлення малих кільових гребенів чи вертикальних стабілізаторів, які майже не впливають на радіолокаційну помітність, але забезпечують достатній момент відновлення курсу. У комплексі такі рішення дають змогу зберегти головну перевагу «літаючого крила» — низький опір, водночас забезпечивши прийнятну стабільність і керованість у широкому діапазоні швидкостей.

Список літератури

1. Ashkenas I. L., Klyde D. H. Tailless Aircraft Performance Improvements with Relaxed Static Stability. NASA Contractor Report 181806. Langley Research Center, Hampton, Virginia, 1989. — 145 с.

2. Pan Y.-L., Huang J. “Effect of Aerodynamic Configuration Parameters on Lateral-Directional Stability of Double-Swept Flying Wing Aircraft.” J. Aerosp. Technol. Manag. 2019;11:e3919. https://doi.org/10.5028/jatm.v11.1074

2. Ramanan G. “Enhancing Performance and Stability of Wing-Alone UAV.” Mathematical Problems in Engineering. 2025;2025:3515887. https://doi.org/10.1155/mse/3515887 .

4. Ashkenas I. L., Klyde D. H. Tailless Aircraft Performance Improvements with Relaxed Static Stability. NASA Contractor Report CR-181806. Langley Research Center, Hampton, VA, March 1989. URL: https://cutt.ly/rtqwUeqE (дата звернення: 6.11.2025)

5. Exploration of split drag-rudder mechanism: “A Differential Configuration of Split Drag-Rudders with Variable Bias for Flying-Wing Aircraft.” Applied Mechanics and Materials. 2014;643:54-59. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.643.54

УДК 658.788

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

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

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ БПАК В ЗИМОВИХ УМОВАХ

Бойовим розрахункам, які експлуатують сучасні безпілотні авіаційні комплекси (БпАК) під час виконання завдань в зимових умовах з метою ефективного їх застосування бажано чітко уявляти та обов'язково враховувати вірогідність обледеніння БпЛА [1].

Метеорологічні умови, що сприяють відкладанню льоду (icing), крижаного нальоту (glaze) або снігу на поверхні літального апарату, пов'язані з наявністю переохолоджених крапель води, високої вологості та температур нижче **0°C** у хмарності або опадах.

В умовах температур зовнішнього середовища нижче **–40°C** ймовірність виникнення обледеніння БпЛА в цьому середовищі мінімальна завдяки відсутності рідкої води в повітрі.

Найбільша вірогідність обледеніння БпЛА виникає при температурі зовнішнього середовища в діапазоні від **0°C** до **–20°C** (найнебезпечніший діапазон: **–2°C** до **–10°C**), разом з тим вірогідність обледеніння БпЛА збільшується при видимість **< 1 км** у ***тумані*** (особливо *переохолоджений*) або ***хмарах*** (особливо *купчасто-дощових* (Cb), *шарових* (St, Sc) та *купчастих* (Cu) з вертикальним розвитком) [2].

Тип опадів та вологість впливають на умови для обледеніння БпЛА наступним чином:

Тип опадів та вологість	Умови для обледеніння
Переохолоджені краплі (Supercooled Large Droplets, SLD)	Найнебезпечніші, великі краплі (Ø > 50 мкм), замерзають при ударі
Переохолоджений дощ (FZRA)	Утворює крижаний наліт (clear ice)
Переохолоджена мряка (FZDZ)	Сильне обледеніння
Мокрий сніг	Прилипає при T ≈ 0°C
Сухий сніг	Прилипає лише при T < –5°C і високій вологості

Існують наступні типи обледеніння БпЛА за відповідними умовами:

Тип обледеніння	Зовнішній вигляд	Умови
Кришталевий лід (Clear Ice)	Прозорий, щільний	Переохолоджений дощ/мряка, T = 0…–10°C
Зернистий лід (Rime Ice)	Матовий, крихкий	Дрібні переохолоджені краплі, T = –10…–20°C
Змішаний лід (Mixed Ice)	Шари прозорого + матового	Зміна T або розміру крапель
Сніг / іній	Білий, пухкий	Мокрий сніг, T ≈ 0°C

HOT (Holdover Time) - максимальний час від кінця обробки поверхонь БпЛА до зльоту, протягом якого поверхня залишається чистою.

Типи рідин (за SAE AMS 1424/1428) [3]:

- *пропіленгліколь + вода + добавки*, помаранчевий колір, *де-айсинг* при T ≈ 60 - 80°C, *HOT* 3–15 хв;

- *пропіленгліколь + загусник*, жовтий / золотистий колір, *анти-айсинг* (холодна), *HOT* 20–80 хв;

- *пропіленгліколь* для повільних ЛА (V < 100 км/г), світло-жовтий колір, *анти-айсинг*, *HOT* 15–40 хв

- *полімерний загусник*, найвища в'язкість, зелений колір, довготривалий *анти-айсинг*, *HOT* 30–120 + хв.

HOT (Holdover Time) - максимальний час від кінця обробки поверхонь БпЛА до зльоту, протягом якого поверхня залишається чистою.

Висновок. Вище наведений аналіз свідчить про те що найнебезпечніше обледеніння БпЛА імовірно при T = –2…–10°C, у хмарах з переохолодженими краплями або переохолодженим дощем/мрякою, та разом з тим сніг прилипає до поверхні БпЛА переважно при T ≈ 0°C і високій вологості. Тому експлуатантам сучасні безпілотні авіаційні комплекси (БпАК) під час виконання завдань в зимових умовах бажано враховувати вірогідність обледеніння БпЛА в наступних *критичних етапах польоту*:

- набір висоти через хмарність 0…–15°C;
- тримання в хмарах при T < 0°C;
- зниження через шар інверсії з опадами;
- виконання польотів при T < 0°C + *вологості* > 70%
- очікування на землі при T ≈ 0°C + *опади*.

Список літератури

1. Holovenskiy V. V., Shmelova T. F., Shmelev Y. M., Tymochko O. I., Boiko S. M., Khebda A. S., Chyzhova L. I., Kirukhina M. V. Unmanned aerial vehicles. Perspectives. Management. Power supply. Multi-authored monograph / Science Editor DSc. (Engineering), Prof. T. F. Shmelova –2019. – 100 pp.

2. ICAO Doc 9640, FAA AC 91-74, EASA icing guidelines.

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

ЗАСТОСУВАННЯ БПЛА В УМОВАХ ЗЛЕДЕНІННЯ

Іній, лід або сніг, що відклалися на аеродинамічних поверхнях, силової установки, органах управління та приймачах тиску навіть у невеликих кількостях можуть мати значний вплив на успішне виконання польоту БпЛА.

Відкладання льоду, крижаного нальоту або снігу на передній кромці і верхній поверхні крила товщиною і шорсткістю, що нагадує грубий наждачний папір, можуть зменшити підйомну силу крила на **30%** і збільшити лобовий опір на **40%**. Тому зледеніння повітряного судна в будь-якій формі становить серйозну загрозу ефективності польоту БпЛА через зміну ***експлуатаційних характеристик***, а саме [1]:

І. Погіршення аеродинамічних характеристик:

- відкладення льоду порушують характер обтікання зовнішньої оболонки профіля крила або лопатей гвинта, що значно зменшує підйомну силу завдяки чого літальний апарат може не відірватися від злітно посадкової смузі (ЗПС), злітно посадкового майданчика або злітно посадкового пристрою в межах експлуатаційного діапазону кута атаки;

- збільшення лобового опору та загальної маси літального апарату може обмежити проектну спроможність досягти ефективної швидкості відриву (Vзв) від землі та стійкого набору гарантованої висоти на розрахункової дистанції зльоту;

- відкладення льоду змінюють геометричну форму профілю крила літального апарату, порушують характер його обтікання, що підвищує потрібне значення еволютивної швидкості (Vев) в наборі висоти та в горизонтальному польоті, все це може привести до наближення зриву обтічного потоку, прояви «режиму трясіння» з наступним звалюванням літального апарату в «штопір»;

- відкладання льоду, крижаного нальоту або мокрого снігу на поврхні органів управління літальним апаратом може привести до погіршення рухомості поверхонь управління та обмеження керованості і маневрових характеристик літального апарату.

2. Зменшення тяги силової установки (двигуна)БпЛА, спричиненої:

- зледенінням повітрозабірників і направляючих лопаток компресора, ушкодженням льодом, що відокремлюється від інших частин ЛА;

- порушення нормальної роботи приймачів динамічного та статичного тиску або датчиків кута атаки, що призводять до:

а) неправильній установці тяги двигунів;

б) спотворення інформації, що вводиться до системи пілотажних приладів, про абсолютну висоту, повітряну швидкість польоту ЛА;

в) помилкове попередження про наближення до режиму звалювання, спричинене відкладанням льоду на датчиках кутів атаки.

3. Відмова системи керування БпЛА внаслідок обмеження руху аж до заклинювання кермових поверхонь.

ІІ. Застосування анти-льодяних рідин (де - айсинг / анти - айсинг) під час експлуатації літальних апаратів у зимових умовах

З метою запобігання утворенню або повторному відкладанню льоду, снігу чи інею на зовнішні поверхні літального апарату протягом певного часу (HOT - Holdover Time) проводиться завчасна обробка зовнішні поверхні літального апарату з застосування анти-льодяних рідин [2]:

Процедура	Мета
Де-айсинг *(De-icing)*	*Видалення* снігу, льоду, інею з поверхонь БпЛА
Анти-айсинг *(Anti-icing)*	*Запобігання* повторному утворенню льоду на *чистій* поверхні БпЛА

HOT (Holdover Time) – максимальний час від кінця обробки поверхонь БпЛА до зльоту, протягом якого поверхня залишається чистою.

Типи рідин (за SAE AMS 1424/1428) [3]**:**

- *пропіленгліколь + вода + добавки*, помаранчевий колір, *де-айсинг* при Т ≈ 60 - 80°С, *HOT* 3–15 хв;
- *пропіленгліколь + загусник*, жовтий / золотистий колір, *анти-айсинг* (холодна), *HOT* 20–80 хв;
- *пропіленгліколь* для повільних ЛА (V < 100 км/г), світло-жовтий колір, *анти-айсинг*, *HOT* 15–40 хв
- *полімерний загусник*, найвища в'язкість, зелений колір, довготривалий *анти-айсинг*, *HOT* 30–120 + хв.

Таблиця HOT (Holdover Time) - приклади (SAE AMS 1428)

Умови	Тип I	Тип II	Тип IV
Легкий сніг	10–15 хв	30–60 хв	60–120 хв
Мокрий сніг	5–10 хв	20–40 хв	40–80 хв
Морозний дощ	3–8 хв	15–30 хв	30–60 хв
Іній (активний)	5–10 хв	20–45 хв	45–90 хв

HOT зменшується при сильному вітру, низькій температурі, інтенсивних опадах.

Стандарти та документи:

Організація	Документ
SAE	AMS 1424 (Тип I), AMS 1428 (Тип II/III/IV)
ICAO	Doc 9640 (Manual of Aircraft Ground De/Anti-icing)
EASA	AMC1 CAT.OP.MPA.250 (Ice and Other Contaminants)
FAA	AC 120-60B (Ground Deicing and Anti-icing Program)
IATA	De/Anti-icing Training Manual

Практичні рекомендації:

- *не злітати з льодом товщиною* ≥ 1 мм (навіть на «не критичних» зонах).
- HOT - *це максимум*, реальний час може бути меншим.
- *анти-айсинг на гарячу поверхню* (>50°C) *не наноситься* – рідина стече.

Висновок. Лише правильне застосування анти-льодяних рідин (*обов'язкова умова безпеки* при T ≤ +5°C та наявності опадів або вологості), використання *двох стадії*, дотримання HOT, вчасне проведення *візуальних перевірок* БпЛА надійна запорука ефективного виконання спеціальних та важливих завдань підрозділами БпАК в зимових умовах функціонування.

Список літератури

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

2. Unmanned aerial vehicles. Perspectives. Management. Power supply. Multi-authored monograph / Holovenskiy V. V., Shmelova T. F., Shmelev Y. M. et al. // Science Editor DSc. (Engineering), Prof. T. F. Shmelova – 2019. – 100 p.

3. ICAO Doc 9640, EASA CAT.OP.MPA.250, SAE AMS 1424/1428, FAA AC 120-60B.

УДК 62-14:669.715.004.15

Коноваленко Ю. А.
аспірант, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

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

Сохрякова І. М.
магістрант НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ ПОРШНІВ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Однією з найвідповідальніших деталей двигунів внутрішнього згоряння, від ресурсу котрої залежить довговічність та надійність роботи всього агрегату, - є поршень. Ливарні алюмінієві сплави, що призначені для виготовлення поршнів, повинні задовольняти наступному комплексу вимог та мати:

- високі ливарні властивості для отримання якісних виливків методом лиття у кокіль;
- підвищену жароміцність, що забезпечує тривалу роботу поршнів в умовах високих робочих температур (250…350 °С);
- підвищену жаростійкість, що забезпечує нормальну роботу поршнів в умовах постійного контакту з агресивним рідинним та газоподібним паливним середовищем;
- низький коефіцієнт термічного розширення, котрий забезпечує холодний зазор між поршнем і сталевою гільзою циліндра, що сприяє підвищенню потужності двигуна та зниженню витрат палива і мастила;
- високу теплопровідність, котра значною мірою визначає тепловий режим поршня;
- високу твердість при підвищених температурах, що запобігає появі задирів і передчасному зношуванню поршнів;
- знижений нахил до змін об’єму в процесі експлуатації при високих температурах з метою попередження утворення на поршнях задирів і тріщин.

Актуальною задачею сьогодення є збільшення ресурсу та потужності двигунів, що викликає підвищення теплових і динамічних навантажень поршнів. У зв’язку з цим, існує потреба у підвищенні якості застосовуваних поршневих сплавів та покращені показників довговічності і надійності.

Одним із найбільш застосовуваних для виготовлення важконавантажених поршнів є жароміцний ливарний силумін АЛ25 (АК12М2МгН). Це евтектичний сплав системи Al-Si, що легований магнієм, міддю, манганом,

нікелем, титаном. Легувальні елементи (Cu, Mn, Ti, Ni) мають низький коефіцієнт дифузії в алюмінієвій матриці, що забезпечує в умовах високої швидкості кристалізації, утворення пересиченого твердого розчину, котрий є доволі стійким при підвищених (робочих) температурах. Присутні у сплаві вторинні фази ($Al_xMg_5Si_4Cu_4$; $Al_{12}Mn_2Cu$; Al_6Cu_3Ni та ін.) блокують зерна твердого розчину та зміцнюють їхні кордони.

З метою підвищення комплексу механічних та експлуатаційних властивостей алюмінієвого поршневого сплаву АЛ25 було проведено дослідну роботу з виготовлення поршнів за експериментальною технологією. Сутність експериментальної технології складалась з використання у якості шихти 100 % вторинної сировини, котра мала підвищений вміст заліза та подальше оброблення розплаву модифікувальним комплексом за патентом України №46094 [1], з наступним термічним обробленням за режимом Т1 [2]. Результати дослідних плавок наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Вплив дослідної технології виробництва на властивості сплаву АЛ25 (АК12М2МгН)

Техно-логічний варіант №	Технологія отримання	Механічні властивості при 20 °С		Твердість НВ після витримки при 300 °С, протягом 100 годин, МПа	Час до руйнування при σ = 50МПа та Т = 300 °С, год
		$\sigma_в$, МПа	НВ, МПа		
0	0 % МК	259	1085	770	138^{45}
1	0,05 % МК	251	1070	760	191^{20}
2	0,10 % МК	257	1370	770	220^{45}
3	0,15 % МК	258	1280	770	411^{45}
4	0,20 % МК	269	1120	770	245^{00}
5	0,25 % МК	249	1070	770	235^{00}
Сплав АЛ25 за ДСТУ 2839-94 [2]		≥190	≥900	-	-

Висновки

1. Дослідна робота, на підставі вивчення змін структури сплаву АЛ25 при робочих температурах поршнів, дозволила науково обґрунтувати явища, що супроводжують процеси експлуатації поршнів.

2. З урахуванням змін структури при високих температурах (~300 °С) розроблено склад модифікувального комплексу [1], який забезпечує отримання при кристалізації оптимальної, з точки зору надійності та довговічності, структури.

3. Відповідно до результатів досліджень за раціональну кількість модифікувального комплексу [1] слід прийняти 0,15…0,20 мас.%.

4. Застосування раціональної кількісті модифікувального комплексу [1] позитивно позначилось на стабільності структури поршнів і призвело до зниження температурного коефіцієнта лінійного розширення на 5,60…5,75 %.

5. Застосування розробленої технології дозволяє використовувати замість коштовної первинної дешеву вторинну шихту та забезпечує збільшення часу до руйнування при σ = 50МПа та Т = 300 °С (див. табл. 1).

Список літератури

1. Пат. 46094 Україна, МПК (2009) С22С1/00. Модифікувальний комплекс для алюмінієвих сплавів / Лоза К.М., Мітяєв О.А., Волчок І.П.; заявник і патентоутримувач Запорізький нац. техн. ун-т. – № u200905914; заявл. 09.06.2009; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 23.

2. ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93). Сплави алюмінієві ливарні. Технічні умови. – Введ.: 01.01.1996. – Взамін ГОСТ 1583-89. – К. : Держстандарт України, 1995 р.

УДК 620.178.3:629.7.036.3:669.295

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

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

АНАЛІЗ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ТРІЩИНИ В ТІЛО ДЕТАЛІ АВІАЦІЙНОГО ДВИГУНА

Процеси втомного руйнування титанових деталей авіаційних двигунів умовно поділяються на три основні етапи:

1. Зародження втомних тріщин
2. Поширення тріщин
3. Руйнування при досягненні критичного розміру дефекту

На першому етапі – інкубаційному періоді – відбувається накопичення дефектів у матеріалі, зокрема зародження та рух дислокацій. Після проходження дислокацій крізь потенційні енергетичні бар'єри кристалічної решітки, які формуються силами внутрішньої взаємодії між атомами, молекулами та зернами, виникають дислокаційні петлі. Ці процеси супроводжуються утворенням ліній ковзання, які згодом об'єднуються у смуги ковзання, формуючи локалізовану структуру з переважною орієнтацією зерен та зсувами по площинах ковзання.

При достатній концентрації дислокацій у центрі їх скупчення утворюється мікродефект – зона, в яку спрямовується накопичена дислокаційна енергія. Цей механізм пояснює раптове, «вибухове» виникнення субмікроскопічних і мікроскопічних тріщин, розміри яких значно перевищують атомні масштаби [1].

У більшості випадків пружне циклічне деформування матеріалу призводить до зародження та росту тріщин без формування значної зони пластичної деформації навколо їх вершин. Таким чином, втомне руйнування має крихкий характер і відбувається без помітного спотворення форми або зміни геометричних розмірів деталі.

Цей тип руйнування зумовлений структурною неоднорідністю матеріалу, що включає випадковий розподіл розмірів зерен, орієнтацій кристалографічних площин, наявність різних фаз, включень та дефектів кристалічної решітки. У зернах, несприятливо орієнтованих до напрямку зовнішнього навантаження, вже на ранніх стадіях виникають лінії зсуву внаслідок руху та об'єднання дислокацій по певних кристалографічних площинах [2].

Виконавши морфологічний аналіз розповсюдження тріщини в тіло деталі можна виділити декілька стадій формування рельєфу:

- формування блоків втомних борозенок в зоні початкового зростання тріщини;
- блоки втомних борозенок, сформовані при руйнування перемичок між сусідніми мезотунелями;
- зони витягування, утворені при руйнуванні перемичок між мезотунелями на тлі фасеточного рельєфу зламу;
- фасеточний рельєф зламу з елементами дрібних ямок і смуг зсуву;
- область переходу від нестабільного втомного руйнування тріщини до остаточного долому з формуванням ямкового рельєфу в результаті швидкого остаточного руйнування.

Висновки

Незважаючи на значний обсяг наукових досліджень, присвячених проблематиці втомного руйнування титанових сплавів, сучасний стан знань свідчить про наявність низки критично важливих питань, що залишаються відкритими. Їх вирішення є необхідною умовою для розробки ефективних конструкційно-технологічних підходів, здатних забезпечити підвищення втомної довговічності титанових виробів в умовах реального навантаження. Довготривалі ефекти, зокрема стабільність сформованої мікроструктури та залишкових напружень у процесі експлуатації протягом тисяч циклів навантаження, залишаються недостатньо вивченими.

Список літератури

1. Опір матеріалів з основами теорії пружності й пластичності / В. Г. Піскунов, В. С. Сіпетов, В. Д. Шевченко и др. – Вища школа, 1995. – 271 с.

2. Дяченко С. С. Фізичні основи міцності та пластичності металів / Дяченко С. С. // Навч. посібник. – Харків : Видавництво ХНАДУ, 2003. – 226 с.

УДК 669.245.018.044:620.193.53

Віниченко В.С.
канд. техн. наук, доцент, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна
Михайлов О.С.
аспірант, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

ВПЛИВ РОБОЧОГО СЕРЕДОВИЩА НА ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНУ КОРОЗІЙНУ СТІЙКІСТЬ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБІННОЇ УСТАНОВКИ

Досліджено вплив робочого середовища на високотемпературну корозійну стійкість та зміну механічних властивостей порожнистих робочих лопаток газотурбінної установки ГТК-10І, виготовлених із жароміцного нікелевого сплаву ЗМІ-3. Показано, що агресивні компоненти газового потоку, зокрема сполуки сірки зумовлюють формування багатошарової корозійної зони, що включає оксидні та сульфідні фази типу TiS і Ti_2S_3. Встановлено, що корозійні процеси розпочинаються вже на ранніх етапах експлуатації та інтенсивніше розвиваються з внутрішнього боку лопатки. Експериментально доведено зниження короткочасної міцності сплаву на 16–20% та скорочення часу до руйнування за тривалого навантаження на 18–22%, що пов’язано зі зміною мікроструктури під дією високих температур. Результати досліджень дозволяють оцінити механізми деградації матеріалу та підтверджують необхідність застосування захисних покриттів для підвищення довговічності деталей газотурбінних установок.

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

КОНСТРУКТИВНІ ЗАХОДИ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ РАДІАЛЬНИХ ВАЛЬНИЦЬ ГТД

Радіальні вальниці ГТД є одним з найкритичніших елементів, які визначають надійність і довговічність силової установки. Умови їхньої роботи характеризуються високими частотами обертання, низькими навантаженнями, високими температурами, та складними режимами змащування [1]. Тому забезпечення підвищення ресурсу вальниць є важливим завданням при проектуванні та експлуатації ГТД.

Основні конструктивні заходи, які сприяють підвищенню ресурсу радіальних вальниць.

1. Вибір матеріалів з високою жаростійкістю та зносостійкістю

Матеріали вальничних кілець та тіл кочення мають забезпечувати стабільність механічних властивостей за високих температур, стійкість до корозії та тривалу роботу в умовах граничних навантажень.

У вітчизняному авіадвигунобудуванні застосовуються матеріали, що були розроблені багато років тому та експлуатуються без суттєвих удосконалень.

Найпоширенішими є сталі типу ШХ15 та їхні модифікації, проте для сучасних ГТД застосовуються матеріали зі стійкішими характеристиками, включаючи жароміцні сплави, карбіди та керамометалічні композити [2].

На АТ «Мотор Січ» проводяться випробування нового вітчизняного матеріалу В-60, виготовленого з урахуванням зменшення дрібнодисперсності та зниження карбідної неоднорідності шляхом подвійного вакуумного переплаву, розробленого ДП «УкрНДІспецсталь».

Використання таких матеріалів запобігає появі мікротріщин, знижує схильність до піттингу та контактної втоми, що прямо впливає на ресурс вальниці.

2. Оптимізація конструкції вузла вальниці

Конструктивні параметри вальниці - діаметр доріжок кочення, геометрія тіл кочення, профіль контактних поверхонь — визначають рівень навантаження та тепловиділення при роботі двигуна.

Оптимізація геометрії вальниці спрямована на удосконалення форми тіл кочення, формування модифікованого контакту, усунення биття торців і фасок відносно поверхні кочення ролика та застосування симетричного модифікованого профілю роликів.

Оптимізація цих параметрів спрямована на:

- зниження контактних напружень між тілами кочення та доріжками;
- забезпечення стабільного обертання тіл кочення;

- мінімізацію перегріву в зоні контакту;
- забезпечення рівномірного розподілу навантаження;
- підвищення вібраційної стійкості вузла.

3. Поліпшення системи змащування

Система змащування є критичним фактором для довговічності вальниці. Недостатній тиск або нестабільний потік мастила може призвести до перегріву, сухого тертя та швидкого руйнування вузла.

Конструктивні заходи включають:

- застосування багатоточкового подавання мастила;
- використання форсунок з оптимізованою геометрією;
- створення стабільних каналів підведення мастила;
- застосування сучасних фільтрів об'ємного типу, що унеможливлює потрапляння сторонніх частинок у зону кочення.

4. Підвищення теплової стабільності вальниці

Надмірне тепловиділення в зоні контакту тіл кочення є однією з основних причин прискореної деградації матеріалів та зниження ресурсу вальниці. Конструктивні заходи для зменшення перегріву передбачають:

- використання тепловідвідних каналів;
- оптимізацію геометрії корпусу для ефективної циркуляції мастила;
- застосування матеріалів із високою теплопровідністю;
- введення додаткових охолоджувальних елементів у вальничний вузол (де це технологічно можливо).

Таким чином, підвищення ресурсу радіальних вальниць ГТД можливе лише за умови комплексного підходу, що охоплює вибір оптимальних матеріалів, удосконалення конструкції вузла вальниці, забезпечення ефективного змащування та контролю теплових режимів. Використання сучасних методів динамічного балансування та впровадження високотехнологічних конструктивних рішень дозволяють істотно збільшити надійність вальниць та продовжити ресурс ГТД у цілому.

Список літератури

1. ДСТУ (ISO 281:2017). Вальниці кочення. Динамічна вантажопідіймальність і номінальний ресурс [Текст] Надано чинності 2017-10-01. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017.

2. Сертифікаційні вимоги для двигунів CS-E, EAAS [Електронний ресурс], 2005. – Режим доступу: https://www.easa.europa.eu/regulations

УДК 621.762:669.017.3

Фасоляк А. В.
канд. фіз.-мат. наук, доцент, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Єршов А. М.
аспірант, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

МЕТОДИ ОЦІНКИ ПРУЖНИХ ТА МІЦНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ

На сьогодні технологія порошкової металургії набула широкого застосування у різноманітних галузях промисловості завдяки економічній ефективності виробництва виробів цим методом. Проте механічні властивості спечених сплавів, зокрема міцність та пластичність, значно поступаються аналогічним характеристикам деформованих та литих матеріалів. Основною причиною такого явища є наявність залишкової пористості у структурі спечених матеріалів.

У науковій літературі представлено різноманітні методи та теоретичні підходи щодо оцінки впливу пористості на міцнісні характеристики порошкових матеріалів. Однак більшість існуючих моделей враховують виключно загальний рівень пористості, залишаючи поза увагою морфологію пор, їх просторовий розподіл та особливості локалізації у структурі матеріалу [1]. Таке спрощення суттєво обмежує можливості достовірного прогнозування запасу міцності виробів на етапі їх проектування та створює необхідність у розробці більш досконалих підходів до оцінки механічних властивостей пористих матеріалів з урахуванням комплексного впливу структурних параметрів пористості.

Один з таких підходів ґрунтується на методі гомогенізації з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) [2]. У межах цього підходу формується **репрезентативний об'єм елемента (RVE)**, який містить реальний набір пор, відтворених за даними мікроструктурної зйомки або статистичної генерації.

Метод дає змогу отримати **ефективні пружні константи**, такі як модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона та модуль зсуву, що поєднують у собі вплив пористості. Важливо, що гомогенізація на основі МСЕ дозволяє враховувати довільну форму пор, їх кластеризацію, взаємодію та анізотропію пористої структури.

Ще один перспективний спосіб комплексного врахування структурних особливостей полягає у застосуванні **фрактального підходу** [2]. Цей підхід ґрунтується на припущенні, що просторовий розподіл пор має

мультифрактальну природу, тобто характеризується масштабною неоднорідністю та самоподібністю на різних рівнях.

У межах даної моделі модуль зсуву усередині матеріалу описується експоненціальною залежністю:

$$G = \mathrm{G}_0 e^{-Af}, \qquad (1)$$

де G_0 – модуль зсуву початкового матеріалу (непористого); f – інтенсивність мультифрактального поля [2], яка описує нерівномірність розподілу пор; A – параметр структури, який залежить від типу пор, їх щільності та фрактальної розмірності.

Фізичний зміст цієї моделі полягає в тому, що появу і розвиток фрактальної пористої структури можна розглядати як процес, що зменшує здатність матеріалу чинити опір зсуву. Чим складніша та більш «багатошарова» порова структура, тим вищим є параметр f і, відповідно, більшим є зниження модуля зсуву.

Поєднання фрактального підходу з МСЕ відкриває можливість створення **гібридних моделей**, які не лише локально описують зміну модулів у матеріалі згідно з (1), а й дозволяють виконувати макроскопічні розрахунки напружено-деформованого стану. Зокрема, поле $G(x, y, z)$, визначене фрактальною моделлю, може бути введене безпосередньо в постановку МСЕ як **матеріальна неоднорідність**, що значно підвищує точність прогнозування локальних зон руйнування та запасів міцності пористих конструкцій.

Таким чином, розглянуті підходи — метод гомогенізації та фрактальні моделі — дозволяють значно підвищити точність оцінювання впливу пористої структури на пружні та міцнісні характеристики матеріалу. Комплексне застосування цих методів є перспективним напрямом у розробці надійних моделей прогнозування залишкової міцності виробів порошкової металургії.

Список літератури

1. Pavlenko D. Advanced materials and technologies for compressor blades of small turbofan engines [Electronic resource] / D. Pavlenko, Y. Dvirnyk, R. Przysowa // Aerospace – 2021. – Vol. 8, No. 1. – Mode of access: https://dx.doi.org/10.3390/aerospace8010001

2. Xi Y. Numerical investigation on effective elastic modulus of multifractal porous materials [Electronic resource] / Y. Xi, L. Wamg, Y. Gao, D. Lei // Fractal and Fractional – 2023. — Vol. 7. – No. 3. — Mode of access: https://doi.org/10.3390/fractalfract7010003

UDC 629:735.4

Mykhaylo Kybalnyy
Lead Designer of Experimental Design Bureau JSC "Motor Sich",
Zaporizhzhia, Ukraine

Mykhailo Orlovskyi
Ph.D, Associate Professor, National Aerospace University "KHAI",
Kharkiv, Ukraine

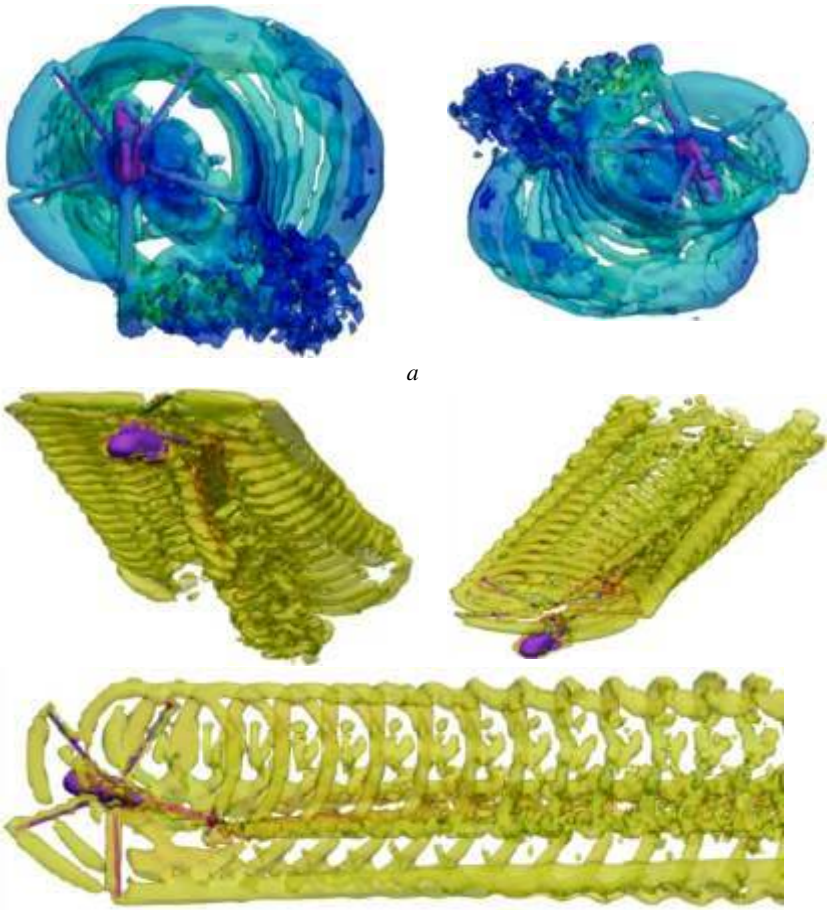
Oleksii Prytula
Lead Designer of Experimental Design Bureau JSC "Motor Sich",
Zaporizhzhia, Ukraine

MODELING OF AERODYNAMIC LOADS ON THE TAIL ROTOR OF A TRANSPORT HELICOPTER UNDER INTERFERENCE WITH THE MAIN ROTOR

One of the most important and complex problems in the design of helicopter tail rotor blades is the prediction of aerodynamic loads on their structure [1]. In general, some of the calculated load cases are completely reproducible either in wind tunnels or in flight. However, there are also those that cannot be reproduced. First of all, this is due to the peculiarities of the tail rotor operation: wind gusts, aerodynamic interference between the main rotor and the fuselage in different flight modes, the "vortex ring" mode, etc. [2].

Modeling a complex vortex structure in which the tail rotor operates in different modes is a serious challenge even for numerical modeling methods. Approaches such as RANS are unable to provide a correct picture of the vortex topology, while approaches such as LES and DES are very resource-intensive and time-consuming.

This work is devoted to modeling the complex vortex structure of the tail rotor for all basic design cases regulated by the Strength Standards and design and operation experience. To solve the problem, the unsteady blade element method supplemented by the vortex particle method was used (Fig.1). The method allows modeling the tail rotor operation taking into account interference with the main rotor, fuselage and stabilizer, taking into account spatial and flap motion of the blades.



a

b

Figure 1 – Vortex wake of rotors in different flight modes
(*a* – hover mode with crosswind; *b* – flight with left slip on the high speed)

References

1. Janković, D.; et all (2017). CFD Calculation of Helicopter Tail Rotor Airloads for Fatigue Strength Experiments. Journal of Aerospace Engineering, 30(5), doi:10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000734

2. Quackenbush, et all. (1990). "Newvortex/surface interaction methods for the prediction of wakeinduced airframe loads." American Helicopter Society, Proc., 46th Annual Forum, Curran Associates, Red Hook, NY.

УДК 629.735.3.

Олексій Притула
провідний конструктор ДКБ АТ «Мотор Січ»,
м. Запоріжжя, Україна

Валентин Пелих
асистент каф. міцності літальних апаратів, НАУ «ХАІ»
м. Харків, Україна

Юлія Пришко
провідний конструктор ДКБ АТ «Мотор Січ»,
м. Запоріжжя, Україна

ОЦІНЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ ПЛАНУЮЧОГО ПОЛЬОТУ МОДИФІКОВАНОГО БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

Під час повномасштабного вторгнення в Україну рф мала значну перевагу в усіх типах озброєнь, зокрема в авіації, яка є однією з головних складових цієї переваги і залишається такою до сьогодення. Для прогнозування подальших варіантів застосування засобів повітряного нападу (ЗПН) слід розуміти їх можливості та на які складові з них противник покладає найбільші надії. З середини 2022 року розпочато спроби комбінувати використання ЗПН різних типів, із оцінкою ефективності їхнього поєднання. Після спроб паралізувати Україну ракетним терором, переживаючи гострий дефіцит авіаційних та крилатих ракет, російські війська почали атакувати українські міста та позиції ЗС за допомогою керованих авіаційних бомб. Вони являють собою ФАБ-500-М62, дообладнані універсальним модулем планування та корекції (УМПК), що наводяться за сигналами GPS-навігації. Застосовують їх фронтові бомбардувальники, винищувачі-бомбардувальники. Удари наносять на відстані до 50 км від переднього краю, до потенційної зони ураження засобами протиповітряної оборони (ППО). Загалом, боєприпаси такого типу застосовують для знищення добре укріплених позицій, заглиблених під землю командних пунктів або для знищення об’єктів військової інфраструктури. Бомби представляють серйозну загрозу для живої сили, навіть в добре укріплених спорудах, для військових та цивільних об’єктів критичної інфраструктури [1]. Російські комплекти УМПК в достатній мірі схожі на JDAM-ER, яка при дозвуковому скиданні з висоти 12 км має дальність у 72 км. Для ФАБ-500-М62 з УМПК, за інформацією з відкритих джерел [1], дальність польоту при скиданні з висоти 10 км дорівнює 55 км, а з висоти 12 км – 60 км. З вересня 2024 року УМПК було модифіковано [1]: одним з ключових аспектів модифікації є збільшення розмаху крила модулю. Для прогнозування подальших варіантів використання ФАБ-500-М62 з модулем УМПК противником дуже важливо розуміти радіус дії даних ЗПН. Тому за допомогою

методів обчислювальної аеродинаміки було розраховано аеродинамічні характеристики ФАБ-500-М62 з УМПК стандартної конфігурації (рисунок 1) та модифікованої (зі збільшеним розмахом крила). Попередні результати розрахунків показують, що при скиданні з висоти 10 км ФАБ-500-М62 зі стандартним модулем УМПК має дальність польоту 66 км, а з висоти 12 км – 79 км, при початковій швидкості польоту 600 км/год. ФАБ-500-М62 з модифікованим варіантом УМПК має наступні характеристики дальності: при скиданні з висоти 10 км максимальна дальність польоту становить 88 км, а з висоти 12 км – 105 км. Отримані значення дозволяють зробити висновок, що модифікація модулю УМПК дозволила підвищити дальність польоту ФАБ-500-М62 на 33%.

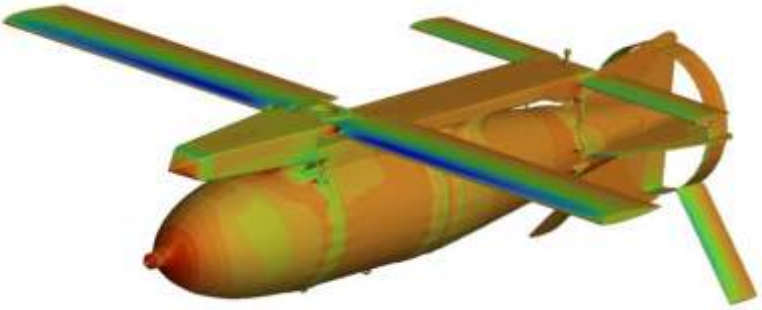


Рисунок 1 – Розподілення коефіцієнту тиску по поверхні
ФАБ-500-М62 з УМПК

Список літератури

1. The Independent Anti-Corruption Commission / Nezalezhna Antikorruptsiyna Komissia (NAKO) – The Makers of Ruin: Glide Bombs, UMPK, and Their Civilian Cost, 108 p., 2025

UDC 629.735.3

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

Valentyn Pelykh
Assistant lecturer, National Aerospace University “KHAI”,
Kharkiv, Ukraine

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

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

METHODOLOGY OF ONE-WAY FSI-ANALYSIS OF AN AIRCRAFT WING

One of the main problems in ensuring strength is the determination of loads acting on the aircraft and its units [1]. Aviation rules require either an accurate determination of loads or a conservative estimate, which allows for an error exclusively in the direction of overestimating loads [2]. Experimental methods for determining loads on a structure require the physical presence of the structure under study, which is not possible at the design stages. At the same time, conservative estimation methods can lead to a significant increase in the mass of the structure, which is a critical indicator in the aviation industry.

The FSI (Fluid Structure Interaction) method is proposed (Fig. 1) – a calculation of the strength of an aircraft wing with actual loads on its structure for an arbitrary calculation case. The wing's structure is built using two-dimensional “shell”-type elements, which allows significantly reducing the required computational resources and reducing the calculation time, which allows for two-way (non-stationary) FSI-analysis in acceptable terms. The calculation of loads is carried out using computational fluid dynamics methods for any design case and is transferred for further calculations in the form of a point cloud. The main advantage of this method is the ability to increase the accuracy of calculations at the design stage of the structure, with a slight increase in the labor intensity of the work, which allows using this approach when solving design optimization problems by parameterizing the design model.

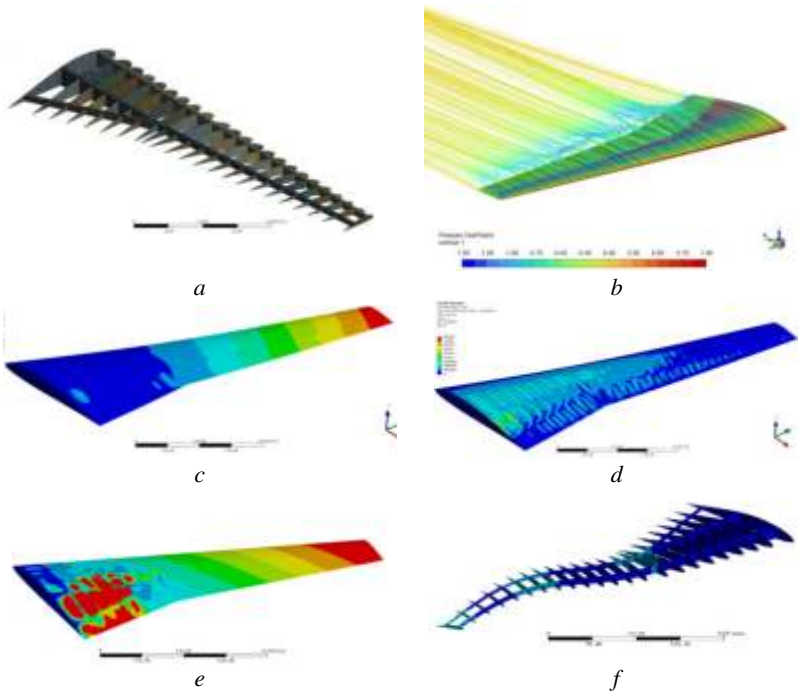


Figure 1 – Results of applying the calculation method to an aircraft wing (*a* – finite element model; *b* – distribution of aerodynamic loads over the wing surface; *c* – displacement; *d* – stress-strain state of the wing; *e* – one of the buckling form; *f* – modal analysis of the wing)

References

1. Кан, С. Н. Расчет самолета на прочность [Текст] / С. Н. Кан, И. А. Свердлов. – М. : Машиностроение. 1966. – 519 с.

2. EASA, “Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for large Aeroplanes (CS-25)”, Cologne, Germany, Standard, 2019.

UDC 629.7.015

Savinov Serhii
Postgraduate student, National Aerospace University, Kharkiv, Ukraine

BUCKLING OF A WEB UNDER TENSION AND SHEAR

The strength analysis and design of struts for high-aspect-ratio wings require determining the ultimate state of the beam web under the combined action of tension, shear, and bending. The reviewed sources describe the limit condition for combinations of compression and shear, shear and bending, and compression and bending. The aim of this work is to demonstrate that the condition for compression and shear can also be applied to the case of tension and shear, provided that the signs are chosen correctly.

The analytical model is shown in Figure 1. The deflection is given by the function:

$$w = C \cdot sin\frac{\pi \cdot y}{b} \cdot sin\frac{\pi}{l} \cdot (x - k \cdot y).$$

Then, the potential strain energy is:

$$U = \frac{\pi^4 \cdot C^2 \cdot D}{8 \cdot b \cdot l} \cdot \left[6 \cdot k^2 + 2 + \left(\frac{l}{b}\right)^2 + \left(\frac{b}{l}\right)^2 \cdot (1 + k^2)^2\right].$$

From the equality of the work of strain energy fluxes:

$$N_x + 2 \cdot k \cdot N_{xy} = \frac{\pi^2 \cdot D}{b^2} \cdot \left[6 \cdot k^2 + 2 + \left(\frac{l}{b}\right)^2 + \left(\frac{b}{l}\right)^2 \cdot (1 + k^2)^2\right].$$

The minimum value of the right-hand side is achieved when $l^2 = 1 + k^2$. Then:

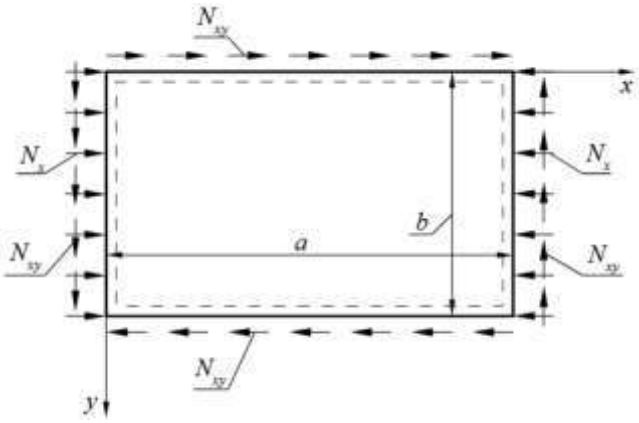


Figure 1 – Web of the strut under normal and shear loading

$$\frac{N_x}{N_{x\,cr}} + \left(\frac{N_y}{N_{xy\,cr}}\right)^2 = 1.$$

The obtained equation represents the limit surface in the N_x and N_y (Figure 2).

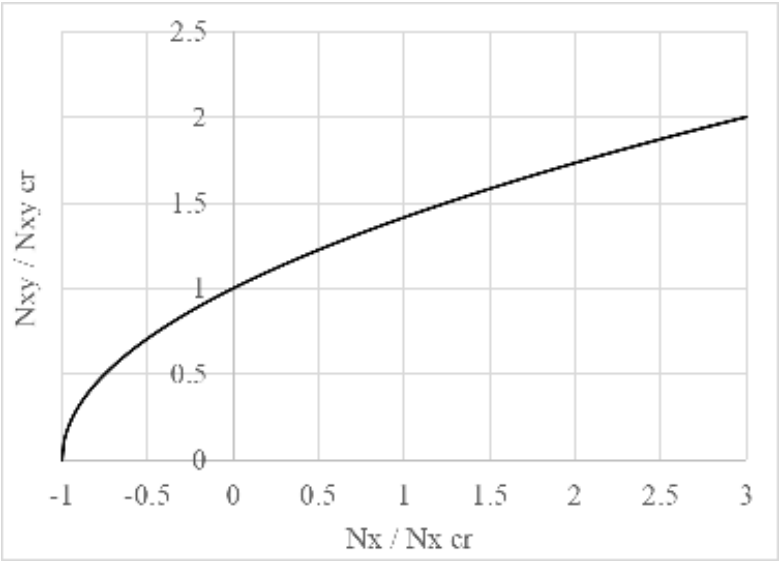


Figure 2 – Limit line (surface)

It should be noted that the critical stress resultants are negative for normal loading, as is the case for compressive loads. The new tensile load is positive, which expands the surface into another quadrant of the graph.

Further research will address the influence of bending loads.

References

1. M. M. Hrebennikov, V. Yu. Miroshnikov, M. I. Pekelnyi (2022). Theories of Strength. Complex Resistance [Electronic resource]: Textbookб Kharkiv: National Aerospace University, 162.

2. A. G. Dybyr, O. V. Makarov, N. I. Pekelnyi (2008). Stability of Longitudinally Compressed Rods. Textbookб Kharkiv: National Aerospace University, 43.

UDC 629.735

Valentyn Pelykh
assistant lecturer, National Aerospace University,
Kharkiv, Ukraine

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

LOAD VERIFICATION OF THE KINEMATIC SCHEME OF THE MI-8 HELICOPTER CONTROL SYSTEM (BOOSTER SECTION)

During the modernization of the booster mounting bracket in the Mi-8 helicopter control system, an important task was to determine the loads depending on the positions of the actuator rods.

The control system bracket was analyzed based on a finite element model (Fig. 1). The verification of forces was performed analytically in a computer algebra system using the calculation scheme shown in Fig. 2. The forces for one of the control channels are shown in Fig. 3.



Figure 1 – Model with boundary conditions for numerical analysis

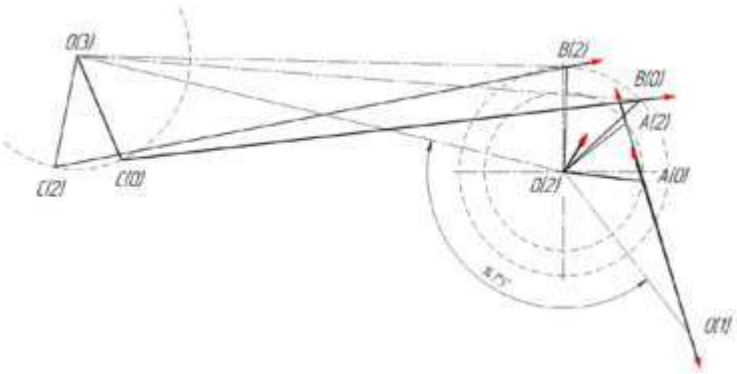


Figure 2 – Analytical scheme

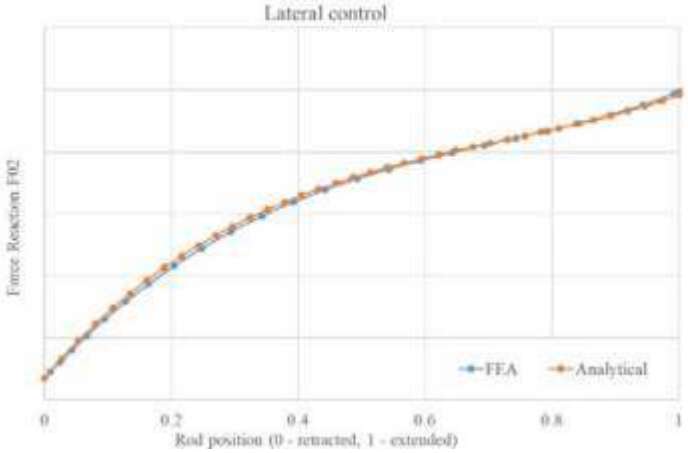


Figure 3 – Forces acting on the bracket

The average error of the calculated force does not exceed 0.001%.

References

1. Pelykh V., Kybalnyy M., Dehtiarenko S. (2024). Transport helicopter root cuff attachment modernization concepts [Electronic resource]. Science and Technology of the Air Force of Ukraineб 55, 2б 23–31. – Mode of access https://doi.org/10.30748/nitps.2024.55.03

2. NASA TT F-519 / Mil B. L. – Helicopters – Calculation and Design. Volume II. Vibrations and Dynamic Stability : Washington DC, 1968. – 496 p.

УДК 621.438:621.515

Гвоздик Р. П.
аспірант, НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна
Бабенко О. М.
канд. техн. наук, НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОЖЛИВОСТІ СКИДАННЯ 100% НАВАНТАЖЕННЯ ГТД Д-336 ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ КЕРОВАНИХ КЛАПАНІВ ПЕРЕПУСКУ ПОВІТРЯ

Газотурбінний двигун Д-336, що використовується як привід електрогенераторів потужністю 6,3–8 МВт, працює в режимі підтримання сталої частоти обертання вільної турбіни для забезпечення генерації електроенергії 50 Гц [1]. При раптовому скиданні 100% навантаження виникає різкий дисбаланс між зменшенням подачі палива та повільним зниженням витрати повітря через компресор, що спричиняє зростання коефіцієнта надлишку повітря до критичних значень та здув полум’я в камері згоряння [2].

Некеровані пневматичні клапани перепуску повітря (КПП) мають час спрацювання 100–200 мс, що перевищує час розвитку здуву (80–150 мс). Відсутність прогнозування та зворотного зв’язку спричиняє згасання камери згоряння у 60–70 % випадків, що фактично унеможливлює скидання повного навантаження.

Запропоновано модернізацію системи перепуску повітря з використанням керованих КПП із пневмоелектричним приводом, швидкодіючими соленоїдними клапанами (5–10 мс) та мікропроцесорним контролером із прогнозуванням скидання 100% навантаження [3]. Ключовою особливістю є випереджувальне відкриття КПП за 30 мс до моменту розмикання вимикача генератора, що дозволяє зменшити витрату повітря через камеру згоряння до початку інтенсивного зниження подачі палива.

Розроблений алгоритм забезпечує: моніторинг швидкості зміни потужності, прогнозування скидання, випереджувальне відкриття КПП, координоване зменшення подачі палива та контроль параметрів горіння. Час повного відкриття клапанів становить ≈50 мс, що у 2–4 рази швидше штатної системи. Ймовірність згасання камери згоряння знижується до менш ніж 5 %.

Модернізація підвищує надійність роботи електростанцій на базі ГТД Д-336, зменшує втрати генерації на 12–21 МВт·год/рік та забезпечує можливість участі в ринку допоміжних послуг. Вартість реалізації складає 360–530 тис. грн із терміном окупності 2–6 років.

Висновок: застосування керованих клапанів перепуску повітря з пневмоелектричним керуванням забезпечує гарантоване скидання 100% навантаження та підвищує ефективність і надійність роботи газотурбінних електростанцій. Модернізація системи перепуску повітря з використанням пневмоелектричного керування соленоїдними клапанами при збереженні

існуючих клапанів КПП, як виконавчих механізмів, є економічно доцільною та критично необхідною для забезпечення участі електростанцій на базі ГТД Д-336 в ринку допоміжних послуг та підвищення надійності енергосистеми України.

Список літератури

1. Технічний опис та інструкція з експлуатації газотурбінного двигуна Д-336-1. – Запоріжжя: АТ «Мотор Січ», 2018. – 286 с.

2. Боровський Б. І. Особливості застосування газотурбінних установок в енергетиці України / Боровський Б. І., Максютін В. І., Кулик М. М. // Промислова енергетика. – 2019. – № 4. – С. 12–18.

3. Сігал О. І. Підвищення надійності газотурбінних установок при скиданні навантаження / Сігал О. І., Смирнов О. В. // Вісник НТУ «ХПІ», Серія : Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2020. – № 1. – С. 45–52.

УДК 629.7

Кішка І. Л.
аспірант, НУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

Головацький Т. Я.
студент, НУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

ВСТАНОВЛЕННЯ НАПРУЖЕНЬ, ЩО ВИНИКАЮТЬ В КРИЛІ ПЛАНЕРА

Планер (рис. 1*а*), який зводимо до однорідної балки (рис. 1*б*), розглядаємо як тіло з розподіленими параметрами з вільними кінцями. Масу фюзеляжу планера відображаємо через зосереджену масу m_c. Вважаємо, що балка здійснює поперечні коливання лише в площині w,x – в площині дії знакозмінної сумарної вимушеної сили збурення, спричиненої можливою дією незбалансованого повітряного гвинта (пропелера). Вплив від хвостової частини планера не розглядаємо.

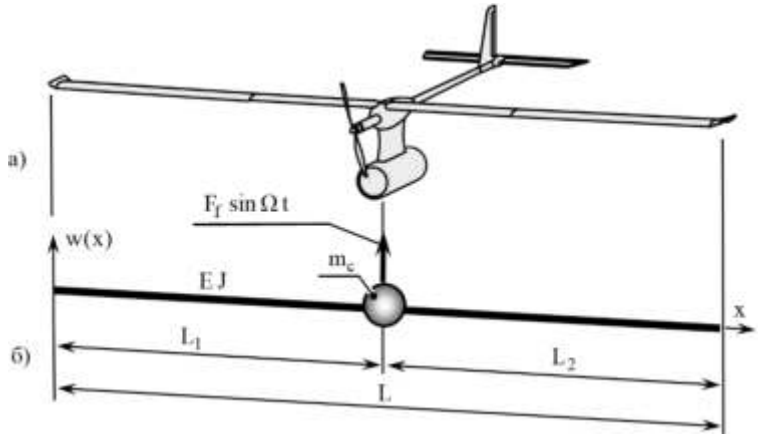


Рисунок 1 – Просторова модель планера (*а*) та його розрахункова схема (*б*)

Балку розбиваємо на два прольоти, довжини яких відповідно $L_1 = L_2 = 0.35$ м, розділені між собою зосередженою масою m_c. Знакозмінна в часі t сила збурення F_f, спричинена наявністю незбалансованого повітряного гвинта (пропелера) планера.

У якості матеріалу для виготовлення планера використано пластик ABS, для якого модуль пружності $E = 2.1 \cdot 10^9$Па. Цей матеріал підходить для невеликих планерів, що виготовляються з використанням 3D друку. Момент інерції поперечного перерізу крила планера становить $J = 7 \cdot 10^{-10}$ м^4, а маса одиниці довжини (метра) крила становить $m_u = 0.35$ кг. Маса фюзеляжу

(зосереджена маса) становить $m_c = 0.1$ кг. Напруження, що виникають в крилі, встановлюються згідно залежності, схожої до [1]:

$$\sigma_1(\mathrm{x}_1) = \frac{E b_n}{2} \cdot \left[A \left(\frac{1}{2} (\mathrm{ch}(\xi x_1)\xi^2 - \cos(\xi x_1)\,\xi^2) \right) + \right.$$
$$\left. + B \left(\frac{1}{2} (\mathrm{sh}(\xi x_1)\xi^2 - \sin(\xi x_1)\,\xi^2) \right) \right] + \frac{q {x_1}^2}{2W}.$$

де $b_n = 0.01$ м – зведена висота балки (висота профілю крила); розподілене навантаження на погонний метр крила становить $q = 4.5$ кг/м. Момент опору поперечного перерізу крила $W = 2.8 \cdot 10^{-7}$м^3; $\xi = \sqrt[4]{m_u \Omega^2 / EJ}$. Постійні A та B відповідно становлять $A = -5.961 \cdot 10^{-4}$м; $B = 5.955 \cdot 10^{-4}$м. Побудувавши залежність $\sigma_1(\mathrm{x}_1)$ (рис. 2), можна говорити, що знакозмінні напруження, які виникають, є допустимими, оскільки для матеріалу ABS максимальні допустимі знакозмінні напруження становлять 10 МПа.

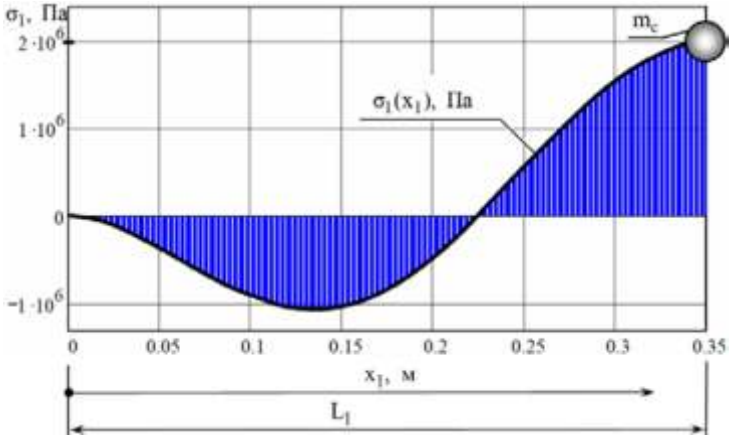


Рисунок 2 – Напруження, що виникають в балці (крилі) на коловій частоті вимушених коливань $\Omega = 524$ рад/с з врахуванням зосередженої маси m_c

Список літератури

1. Determination of the first natural frequency of an elastic rod of a discrete-continuous vibratory system / O. Lanets, O. Kachur, V. Korendiy, P. et al. // Vibroengineering Procedia. – 2021. – 37 (2021). – P. 7–12.

УДК 621.891

Петров О. Д.
аспірант, Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Плівак О. А.
інженер, Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Парненко В. С.
канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ Україна

Корбут Є. В.
канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СВЕРДЛІННЯ ВУГЛЕПЛАСТИКІВ ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ РІЗАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СВЕРДЛА

На теперішньому етапі розвитку промисловості спостерігається значне збільшення частки використання полімерних композиційних матеріалів (ПКМ)[1]. Це пояснюється у здатності формувати на їх основі матеріали та конструкційні елементи із наперед заданими експлуатаційними властивостями, які оптимально відповідають специфіці та умовам функціонування деталей і виробів. Орієнтація волокон зумовлює анізотропію властивостей матеріалу, що створює передумови для виготовлення виробів із керованою міцністю та пружними характеристиками. Водночас характерною особливістю таких матеріалів є поєднання процесів їх формування та отримання практично готового виробу в межах єдиного технологічного циклу. Використання ПКМ у авіаційній та аерокосмічній промисловості, де до виробу висуваються підвищені вимоги і це потребує застосування механічної обробки. Механічна обробка ПКМ різанням характеризується низкою специфічних особливостей, які зумовлені, насамперед, структурою та властивостями матеріалу[2]. Процес різання ПКМ супроводжується явищами, аналогічними тим, що спостерігаються при обробці металів, зокрема: стружкоутворенням, виникненням силових та теплових ефектів, а також інтенсивним зношуванням різального інструмента (РІ). Свердління є однією з найпоширеніших операцій механічної обробки ПКМ. У випадку плит та пластин ця операція виконується для утворення отворів під елементи кріплення та для інших експлуатаційних цілей. У оболонках основним завданням свердління є отримання великої кількості отворів для штифто-болтового з’єднання з іншими елементами конструкції. Основні вимоги до отворів включають забезпечення точності в межах 10–13 квалітетів та

шорсткості поверхні Rz=10–40 мкм. Специфічні властивості оброблюваних ПКМ визначають особливості теплових процесів під час їх різання. На відміну від металів, ПКМ характеризуються низькою теплостійкістю: при температурах понад 300–350 °С відбувається інтенсивна термодеструкція та розкладання полімерного наповнювача. Це призводить до різкого погіршення механічних властивостей матеріалу, утворення припалів та значного дефектного шару. Тому обробку ПКМ слід проводити за режимів, що забезпечують підтримання температури матеріалу нижче 300 °С. Утворення теплоти під час різання ПКМ обумовлено роботою деформацій, тертям стружки об оброблювану деталь та передню і особливо задню поверхні РІ, механічними перетвореннями полімеру та диспергуванням армуючих волокон. Якість обробленої поверхні матеріалів характеризується численними параметрами, які умовно можна розділити на дві групи: фізико-хімічні та геометричні. Інтенсивне зношування свердел під час обробки композиційних полімерних матеріалів обумовлюється рядом факторів, серед яких слід зазначити тертя стружки та заготовки об поверхню інструменту, пластичну деформацію та перегрів різальної кромки, абразивний вплив армуючих волокон тощо. Наслідком такого зношування є зниження точності та якості обробки, особливо у випадках частої зміни РІ на всіх етапах обробки [3]. Під час свердління отворів зношування свердел відбувається переважно по задній поверхні та шляхом округлення різальної кромки. Підвищення якості та продуктивності обробки деталей з ПКМ потребує застосування високоефективного різального інструменту (РІ) з підвищеними показниками зносостійкості та теплостійкості, високою теплопровідністю і низьким коефіцієнтом тертя, що пов’язано з анізотропією ПКМ та їх фізико-механічними властивостями. Виконання цих вимог є необхідною умовою забезпечення належної якості процесів механічної обробки. Підвищення ефективності та якості обробки ПКМ методами різання тісно пов’язане з удосконаленням конструкцій і матеріалів інструментів, спрямованих на підвищення їх працездатності та надійності в умовах інтенсивного зношування. Для мінімізації негативних наслідків зазначених проблем розглядається зміцнення робочих поверхонь шляхом нанесення зносостійких дискретних покриттів. Застосування таких покриттів підвищує фізико-механічні характеристики інструментальних матеріалів, що дозволяє зменшити використання дорогих сплавів і покращити експлуатаційні властивості РІ. Хоча питання використання зносостійких покриттів у процесах різання металів досить добре вивчене, для обробки ПКМ ці дослідження залишаються обмеженими та потребують подальшого розвитку. Для підвищення зносостійких властивостей інструментів із швидкорізальних та твердосплавних матеріалів активно використовуються покриття на основі карбіду та нітриду титану (TiC, TiN), а також їхніх складних сполук (TiAlN, TiCN). Тверді тонкі вакуумно-плазмові покриття характеризуються наявністю

значних залишкових напружень, які формуються ще на етапі їхнього осадження. Напружено-деформований стан (НДС) спричинений невідповідністю властивостей між матеріалом покриття та основою. В процесі різання під дією силового та температурного навантаження можливо виникнення когезійного розтріскування. Підвищення когезійної та контактної міцності модифікованого шару напряму пов'язано з формуванням системи з мінімальним рівнем НДС. В PVD-покриттях структурні напруження зумовлені дефектами, що виникають під час конденсації, які тісно пов'язані з мікроструктурою покриття. Дефекти залежать від режимів осадження та від часу нанесення, який визначає товщину покриття. Температурна компонента напружень формується внаслідок різниці теплових коефіцієнтів розширення покриття і підкладки.

Досліджуваний процес підвищення працездатності інструменту для обробки ПКМ шляхом нанесення дискретного покриття на його робочі поверхні передбачає розв'язання низки науково-технічних завдань:

- визначення оптимального за складом захисного зносостійкого покриття, яке відповідає критеріям, зазначеним вище, що дозволить забезпечити якість обробки;

- визначення НДС дискретного покриття після його нанесення на РІ;

- розробка конструктивних схем модифікованого поверхневого шару РІ для обробки ПКМ на основі визначеного НДС покриття з урахуванням його когезійної міцності.

Зазвичай для PVD-покриттів характерні залишкові напруження стиску, які, залежно від товщини шару та фізико-механічних властивостей основи, можуть змінюватися до слабких розтягуючих напружень. Наявність залишкових напружень стиску сприяє підвищенню тріщиностійкості та зносостійкості модифікованих поверхонь, а також позитивно впливає на показники витривалості й межі плинності. Водночас надмірні напруження стиску можуть знижувати механічну надійність покриття – підвищується його крихкість, зростає ризик самовільного відшарування або порушення адгезії до основи як до початку експлуатації, так і в процесі роботи виробу [4]. Наявність великих контактних площ по задній поверхні інструмента при різанні ПКМ призводить до суттєвого перерозподілу складових сил різання, що в свою чергу впливає на якість та точність отриманих виробів. Основною особливістю силової взаємодії при обробки різанням ПКМ є високий рівень впливу сил на задню поверхні інструмента, яка складає 40–60 % від загальної сил різання. Це викликано пружним відновленням поверхневого шару матеріалу ПКМ. Для визначення впливу дискретизації задньої поверхні РІ на величину та розподіл сил різання необхідно провести порівняльне дослідження сил різання при використанні інструмента зі суцільними різальними поверхнями та інструмента з дискретно модифікованими робочими поверхнями. Сили, які діють по задній поверхні РІ виникають у результаті пружного відновлення

оброблюваного матеріалу їх можна розглянути як статичне вдавлювання задньої поверхні інструмента в матеріал композита.

Дискретизація задньої поверхні РІ призводить до зниження концентрації напружень на задній поверхні інструменту за рахунок дискретних ділянок, які являються відокремленими різальними елементами, де в результаті переривчастого контакту різальних елементів – дискретів та пружних деформацій – релаксацією матеріалу ПКМ виникають напруження, величини яких більші ніж міцність композиту, що дозволяє на задній поверхні інструменту отримати процес різання. Так як покриття дискретне, то можна припустити, що час контакту поверхонь РІ та матеріалу, що обробляється зменшиться, що позитивно вплине на якість отриманної поверхні виробу. Для вирішення доцільності використання інструменту з дискретно модифікованими робочими поверхнями необхідно дослідити вплив дискретизації робочої поверхні на силу різання. Розрахунки показали, що дискретизація різальної частини інструменту призводить до зменшення значення сили різання при свердлінні, що в свою чергу дозволить: зменшити фактичну площу контакту по задній поверхні інструмента; збільшити швидкості деформації композита; зменшити температуру різання; зменшення наслідків різання; збільшення крихкості руйнування композита та зменшення роботи пластичної деформації.

Висновки

При механічній обробці деталей з ПКМ стикаються з наступними проблемами:

1. Складність отримання високої якості оброблюваних поверхонь (необхідної шорсткості, точності, відсутність розшарування, сколів, ворсистості і т.п. за рахунок анізотропії властивостей матеріалу, низьким адгезійним зв’язком між армуючим матеріалом та матрицею;

2. Низькою теплопровідністю ПКМ в результаті чого відбувається малий відвід тепла з зони різання, що призводить до температурних дефектів поверхні;

3. Інтенсивне абразивне зношення РІ за рахунок впливу твердого наповнювача ПКМ;

4. Низька продуктивність процесу із-за низьких швидкостей різання;

5. Пружне відновлення (усадка) формоутворених поверхонь ПКМ знижує точність обробки;

6. Виділення дрібнодисперсних летких токсичних частинок ПКМ під час обробки.

За рахунок використання РІ з дискретизованною різальною частиною зменшується сила різання, порівняно з інструментом з суцільною різальною частиною в межах 60–70% в залежності від щільності різальних елементів.

Список літератури

1. Лабунець В. Ф. Перспективи використання композиційних матеріалів в авіакосмічній галузі / Лабунець В. Ф., Корбут Є. В., Адаменко Ю. І. // Проблеми тертя та зношування: науково-технічний збірник. – Київ, 2011. – Вип. 56.

2. Тарасюк А. П. Технологія механічної обробки полімерних матеріалів: монографія / Тарасюк А. П., Кондратюк О. Л., Верезуб Н. В. – Харків, 2015. – 226 с.

3. Formation of the quality of holes obtained by drilling in aviation structures made from polymer composite materials Borys Lupkin, Oleksii Andrieiev, Kateryna Maiorova, Victor Antonyuk, Sergii Vysloukh // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, №3/1 (123) 2023. P. 59-67.

4. Сорока О. Б. Перспективні конструктивні схеми зносостійких покриттів для інструментів та деталей машин / Сорока О. Б., Клименко С. А., Копєйкіна М. Ю. // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – 2011. – № 11. – С. 259–271.

УДК 621.7.043

Федосєєва В. О.
аспірантка, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

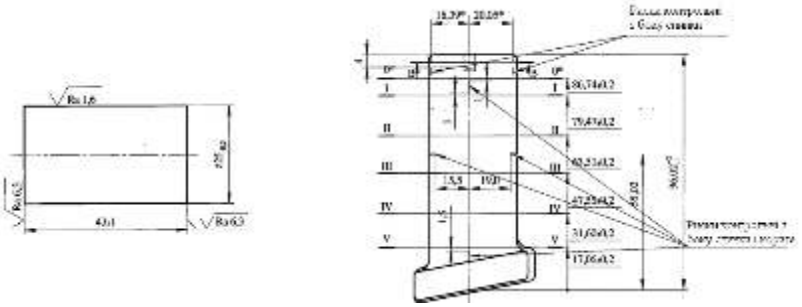
Огнєв В. В.
інженер-технолог, АТ «Мотор Січ»
м. Запоріжжя, Україна

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

ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛОПАТКИ КОМПРЕСОРА НА ГВИНТОВОМУ ПРЕСІ

Лопатки – основні елементи газотурбінного двигуна. Виготовлення лопаток займає особливе місце в сучасному двигунобудуванні.

Заготовка робочої лопатки 3 ступені ротора компресора отримується з гарячекатаного прутка сталі 14Х17Н2-Ш (рис. 1*а*). Маса заготовки – 0,164 кг.



а *б*

Рисунок 1 – *а* – заготовка; *б* – готова деталь

Виконуються такі операції:

1. Токарна. Різання і механічна обробка заготовки. Контроль.

2. Підготовка обладнання. Обов'язкове ведення термограми. Нагріти штампи до 150…250 °С.

3. Нагрівання в електропечі. Температура печі - 1040^{+10}_{-20} °С. Температура обробки - $\frac{1050\ °C}{900\ °C}$. Час нагрівання - $\frac{20}{35}$ хв.

4. Осаджування на КГШП КБ 8042. Охолоджувати уповільнено.

5. Очистка гідроструйна в тихохідному барабані (до 5 об/хв). Контроль. Зачистка. Контроль.

6. Міднення електрохімічне в гальванічному цеху. Контроль. Очистка.

7. Підготовка обладнання (згідно п.2).

8. Нагрівання (згідно п.3).

9. Видавлювання на кривошипному пресі 160 тс.

10. Хімічне травлення (розпушування окалини) в сірчаній кислоті.

11. Очистка гідроструйна. Зачистка. Контроль. Зачистка. Галтування. Контроль. Зачистка. Контроль. Очистка.

12. Підготовка обладнання. Нагрівання в барієвій ванні: 1220_{-20} °С, $\frac{1220\,°С}{950\,°С}$, $\frac{1}{2}$ хв.

13. Штампування на електрогвинтовому пресі 1600 тс. Очистка.

14. Підготовка обладнання. Нагрівання в електропечі: 680_{-30} °С, $\frac{680\,°С}{650\,°С}$, $\frac{5}{30}$ хв.

15. Обрізка облою на кривошипному пресі 160 тс. Зачистка. Очистка гідроструйна. Травлення хімічне. Галтування. Контроль. Зачистка. Контроль. Очистка.

16. Підготовка обладнання. Нагрівання в електропечі: 1070^{+10}_{-20} °С, $\frac{1080\,°С}{950\,°С}$, $\frac{10}{30}$ хв.

17. Калібрування на електрогвинтовому пресі 1600 тс. Очистка гідроструйна. Зачистка. Контроль. Зачистка. Міднення електрохімічне.

18. Термообробка в термічному цеху.

19. Травлення хімічне в азотній кислоті. Очистка гідроструйна. Галтування. Контроль. Зачистка. Контроль. Очистка.

20. Підготовка обладнання.

21. Правка на електрогвинтовому пресі 1600 тс. Контроль. Зачистка.

22. Маркування. Контроль готової деталі (рис. 1*б*).

Таким чином, був досліджений і вдосконалений технологічний процес виготовлення лопатки компресора на електрогвинтовому пресі 1600 тс.

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

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ВІБРАЦІЙ У ПРОЦЕСІ ФРЕЗЕРУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ

Проблема виникнення коливань у процесі фрезерування деталей залишається однією з ключових у забезпеченні стабільності та ефективності механічної обробки. Надмірні та неконтрольовані вібрації негативно впливають на якість поверхні, точність обробки, знос інструменту та загальну надійність всього технологічного процесу [1]. Оцінка цього явища під час фрезерування вимагає системного підходу до аналізу та усунення причин, основними з яких є недостатня жорсткість системи «інструмент–заготованка–обладнання», резонансні явища та самозбуджуючі вібрації (chatter), геометричні похибки, зношення інструменту. Сучасні технології та методи діагностики дозволяють зменшити негативний вплив коливань і покращити ефективність виробничих процесів [2]. Складність прогнозування вібраційного стану у процесі фрезерування обумовлена переривчастим характером процесу різання та відносно невеликою тривалістю безпосередньої обробки, під час якої за певних обставин діють тільки вимушені та супроводжуючі вільні коливання, інтенсивність яких і визначає якість обробленої поверхні.

Традиційні методи контролю вібрацій мають обмежені можливості, особливо в реальному часі. У зв’язку з цим є актуальність застосування технологій штучного інтелекту (ШІ), які дозволяють прогнозувати виникнення вібрацій і оперативно коригувати параметри обробки [3]. ШІ, зокрема методи машинного та глибокого навчання, дають змогу аналізувати великі обсяги баз даних і виявляти закономірності, що передують виникненню вібрацій. Алгоритми можуть бути натреновані для розпізнавання несприятливих явищ у реальному часі та прогнозування їх появи з високою точністю.

Типова система прогнозування вібрацій може включати такі основні модулі: визначення початкових умов процесу та проведення теоретичного аналізу, збір експериментальних даних з датчиків на різноманітних режимах роботи, попередня обробка отриманих результатів, розробка аналітичного модулю машинного навчання (нейронні мережі, дерева рішень тощо), створення інтерфейсу взаємодії та алгоритму дій (виведення попереджень, керування параметрами обробки), розробка моделі машинного навчання та

втілення базисів у спеціальному програмному продукті для конкретних процесів механічної обробки, оцінка точності та стійкості запропонованої моделі.

Компанії Siemens, FANUC, Okuma вже реалізують в системах верстатів з ЧПК інтелектуальні модулі моніторингу, які використовують ШІ для виявлення вібрацій та керування процесом обробки. Це дозволяє аналізувати дані з датчиків у реальному часі та прогнозувати критичні ситуації до їх настання, але їх робота ще не ідеальна та потребує доопрацювань [4]. В наукових дослідженнях також успішно реалізовано прогноз зносу інструменту на основі вібраційних характеристик за допомогою нейронних мереж.

ШІ є потужним інструментом для оцінки вібрацій під час фрезерування. Його використання дозволить своєчасно ідентифікувати нестабільні режими та запобігти аваріям. Основними технічними викликами залишаються обмеженість даних, складність інтерпретації результатів та недостатня інтеграція з промисловими системами. Вирішення цих проблем стане ключем до широкого впровадження інтелектуального моніторингу у промисловості.

Список літератури

1. Яхно Д.А. Дядя С.І. Актуальність пригнічення коливань при обробці різанням // Науково-практична конференція «Тиждень науки-2023»: Збірник тез доповідей «Машинобудівний факультет». – Запоріжжя: Національний університет «Запорізька політехніка», 2023. – С. 11.

2. Яхно Д.А., Дядя С.І. Особливості коливань при кінцевому фрезеруванні та напрямки зменшення їх інтенсивності // Матеріали та програма XI Всеукраїнської науково-технічної конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві» – Суми: Сумський державний університет, 2024. – С. 82.

3. Zhang, J., та ін. (2019). Vibration signal analysis using machine learning для tool condition monitoring. Journal of Intelligent Manufacturing, 30, 2515-2526.

4. Siemens AG. SINUMERIK Edge – Industrial Edge Computing for Machine Tools, 2021.

УДК 621.791.7:669.245.6:621.43-242:621.785

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

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

Чигілейчик С.Л.

доктор філософії, АТ «Івченко-Прогрес»,
м. Запоріжжя, Україна

ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПРИДАТНОСТІ ВІДНОВЛЕННЯ РОБОЧИХ ЛОПАТОК ГТД МЕТОДОМ МІКРОПЛАЗМОВОГО ПОРОШКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ СПЛАВОМ ЖС32-ВИ

Литі жароміцні нікелеві сплави, з яких виготовляють робочі лопатки газотурбінних двигунів (зокрема ЖС3ДК, ВЖЛ12, ЖС32-ВИ), характеризуються високим вмістом зміцнювальної γ′-фази та схильністю до тріщиноутворення під час традиційних ремонтних процесів із великим тепловкладенням. Це обмежує ремонтопридатність тонкостінних профілів і стимулює пошук технологій з контрольованим тепловкладенням дуги й мінімальною зоною термічного впливу. Мікроплазмове порошкове наплавлення (МППН) є перспективним підходом для відновлення профілю лопаток з формуванням металургійно повноцінного шару при зниженій ймовірності дефектів, порівняно з технологіями TIG/MIG наплавлення [1].

Метою дослідження було перевірити можливість відновлення профілю лопатки методом МППН із використанням порошку сплаву ЖС32-ВИ та оцінити відповідність базових механічних характеристик вимогам технічних умов ТУ 1-92-177-91. Після видалення дефектної зони профіль відновлювали пошарово МППН з контролем тепловкладення та геометрії наплавленого валика; з відновленої ділянки отримано п’ять плоских зразків розміром близько 115×15×2 мм із фіксацією орієнтації відносно напрямку нашарування. Застосовано теромообробку за режимом 1255 ± 10 °C протягом 1–1,5 години з подальшим охолодженням відповідно до регламенту; у роботі акцентовано на базових механічних випробуваннях при кімнатній температурі та мікроструктурному аналізі у зоні наплавлення та на межі «основа–наплавлений метал».

Отримані значення тимчасового опору та відносного подовження наплавленого металу становили відповідно σ_v = 1147 МПа та δ = 9,5 %, що перевищує вимоги ТУ 1-92-177-91 ($\sigma_v \geq 883$ МПа; $\delta \geq 6{,}0$ %). Фрактографічно злами мали переважно зернисту будову без ознак макродефектів. До

термообробки спостерігався γ-твердий розчин з дисперсними виділеннями γ′, карбідами та дрібною (γ+γ′)-евтектикою, характерною для литого стану ЖС32-ВИ; після термообробки мікроструктура відповідала нормативному стану сплаву. Візуально-вимірювальний контроль не виявив відхилень геометрії, що виходять за межі допусків для ремонтного відновлення профілю, однак для остаточного підтвердження технологічної придатності процесу доцільним є 3D-сканування профілю до/після відновлення з оцінюванням шорсткості та допусків по хорді та товщині.

Результати підтверджують технологічну придатність МППН для формування нашарувань сплаву ЖС32-ВИ під час відновлення робочих лопаток: за показниками σ_v та δ досягнуто і навіть перевищено рівень, визначений технічними умовами. З огляду на специфіку експлуатації лопаток у високотемпературному циклі, подальше впровадження процесу в серійний ремонт потребує розширеної програми випробувань: визначення межі плинності $\sigma_{0.2}$, твердості та пористості в різних зонах перерізу, неруйнівного контролю зони сплавлення, оцінювання глибини змішування та ширини зони термічного впливу, а також досліджень повзучості, термовтоми та ударної в'язкості за робочих температур. Для відтворюваності результатів важливо стандартизувати режимні параметри МППН (струм, витрати плазмоутворювального та транспортного газів, розмір і витрату порошку, швидкість подачі, крок шарів і міжшарову температуру) та повний цикл термообробки відповідно до ТУ для ЖС32-ВИ, із чітким описом охолодження.

Водночас, сукупність отриманих даних дозволяє розглядати мікроплазмове порошкове наплавлення як ефективну технологію ремонтного дновлення тонкостінних профілів робочих лопаток із литих нікелевих жароміцних сплавів. За умови виконання розширених випробувань і нормування режимів процес може бути інтегрований у серійні маршрути ремонту як енергоефективна альтернатива процесам із надмірним тепловкладенням, забезпечуючи необхідний рівень механічних властивостей і відповідність мікроструктурним критеріям працездатності.

Список літератури

1. Дослідження і оптимізація процесу серійного ремонту робочих лопаток авіаційного газотурбінного двигуна Д-18Т микроплазмовим порошковим наплавленням / К.А. Ющенко, О.В. Яровицін, Г.Д. Хрущов та ін. // Космічні матеріали та технології. – 2022. – Т.28 № 3. – С. 3–16. https://doi.org/10.15407/knit2022.03.003.

УДК 338:658.5

Павленко Д. В.
професор, завідувач кафедри технології авіаційних двигунів
НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна

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

РОЗРОБЛЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВИБОРУ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ГАРЯЧОГО ТРАКТУ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Сучасні авіаційні двигуни працюють в екстремальних умовах високих температур, тиску та навантажень. Вибір матеріалів для деталей гарячого тракту є критично важливим чинником, що визначає довговічність та ефективність роботи двигуна. Враховуючи це, підвищення якості вибору матеріалів є одним із пріоритетних завдань сучасного авіаційного виробництва [1, 2].

Метою роботи є створення інтелектуальної системи, яка на основі аналізу довідкових даних про нікелеві та титанові сплави і застосування методів машинного навчання забезпечує вибір оптимального матеріалу для конкретних умов експлуатації деталей гарячого тракту авіаційних двигунів.

Для формування бази знань використано довідники Масленкова [1] та Калачева [2], що містять дані про хімічний склад, температуру плавлення, жароміцність, повзучість та корозійну стійкість сплавів. Застосування алгоритмів машинного навчання (Random Forest, XGBoost, нейронні мережі) дозволило створити модель, здатну автоматично класифікувати сплави та прогнозувати їх придатність за критеріями температурного ресурсу і стабільності мікроструктури.

Система протестована на прикладах реальних нікелевих сплавів (Inconel, Rene, MAR-M), а також порівняльних титанових сплавів, що дозволило підтвердити її універсальність. Результати моделювання показали, що застосування машинного навчання підвищує точність і швидкість вибору матеріалів порівняно з традиційними методами аналізу. Подібні підходи активно використовуються у сучасних дослідженнях [3, 4], що підтверджує актуальність обраного напряму.

Інтелектуальна система може бути інтегрована в процес конструкторської підготовки виробництва авіаційних двигунів, що сприятиме скороченню часу проектування та підвищенню надійності елементів гарячого тракту.

Таблиця 1 – Приклад характеристик нікелевих сплавів

Сплав	Температура плавлення, °С	Границя міцності, МПа
Inconel 718	1350	1250
Rene 80	1320	1400

Список літератури

1. Масленков С. Б. Стали и сплавы для высоких температур / Масленков С. Б., Масленкова Е. А. – М. : Металлургия, 1991. – 383 с.

2. Калачев Б. А. Механические свойства титана и его сплавов / Калачев Б.А., Ливанов В.А., Буханова А.А. – М. : Металлургия, 1974. – 544 с.

3. Assessment and Prediction of the Pitting Resistance of Plate-Like Heat Exchangers Made of AISI304 Steel / Narivskyi O. E., Subbotin S. A., Pulina T. V., Khoma M. S. // Materials Science, 2022. – 58. – P. 41–46.

4. Mathematical Modeling of the Corrosion Behavior of Austenitic Steels../ Narivskyi O.E. et al. // Eurasian Chemico-Technological Journalю – 2022. – 24(4). – P. 295–302.

УДК 621.762.793:669.15

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

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

Кононов Г.В.
магістр, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОЇ ОБРОБКИ НА ЯКІСТЬ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

Конструкційні матеріали, що використовуються для виготовлення деталей авіаційних двигунів, мають високі характеристики міцності, що ускладнює їх механічну обробку. Крім цього на експлуатаційні властивості двигунів впливає якість поверхневого шару деталей, що залежить від виду напружень, які залишаються в них після механічної обробки. Тому актуальною проблемою є створення технології виготовлення авіаційних деталей з важкооброблюваних матеріалів, яка забезпечує, як продуктивність виготовлення, так і вимоги креслення щодо точності розмірів, форми та якості поверхневого шару. В зв'язку з цим широкого застосування при виготовленні авіаційних деталей набуває високошвидкісне фрезерування. Під час лезової обробки відбувається зміна напружено-деформованого стану, збільшується щільності дефектів дислокаційної структури, підвищується міцність, але знижується пластичність, які відрізняються від основного матеріалу. За рахунок цих змін механічна обробка суттєво впливає на спротив утомленому руйнуванню деталі через надмірну розтягуючу залишкову напругу в поверхневому шарі, які зі стискаючою напругою у внутрішньому шарі призводять до деформації деталі. На відміну від високошвидкісного фрезерування електроерозійна обробка, через відсутність механічного контакту між інструментом та деталлю, не створює макроскопічних залишкових напружень і не викликає пластичних деформацій у поверхневому шарі деталі, що позитивно впливає на розмірну точність та якість поверхневого шару.

Лазарєв І. О.
аспірант, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна,
Сахнюк Н. В.
канд. техн. наук, доцент, АК АТ «Мотор Січ», м. Запоріжжя, Україна
Роп'як Л. Я.
д-р техн. наук, професор, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, Україна

ФОРМУВАННЯ НА АЛЮМІНІЇ ЖАРОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ ПЛАЗМОВИМ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИМ ОКСИДУВАННЯМ

Алюмінієві сплави мають високу питому міцність, добре піддаються обробці різними методами, але деталі виготовлені з цих сплавів потребують поверхневого зміцнення. Перспективним методом формування оксидних покриттів є плазмове електролітичне оксидування (ПЕО) [1–3]. Вибрано деталі авіаційної та ракетно-космічної техніки із алюмінієвих сплавів для зміцнення оксидними жаростійкими покриттями, які формують ПЕО.

Об'єкт дослідження — технологічний процес виготовлення деталей з оксидними покриттями, які формуються (ПЕО), для експлуатації в агресивних та абразивовмісних середовищах за підвищених температур.

Мета роботи — розроблення енергоефективної технології формування жаростійких покриттів на алюмінієвих сплавах плазмовим електролітичним оксидуванням.

Методи дослідження — системний підхід, методи математичного та комп'ютерного моделювання, а також проведення лабораторних експериментів.

На основі результатів комп'ютерного моделювання встановлено, що поступове заміщення алюмінію хромом у покритті призводить до покращення його властивостей. Використання функціонально градієнтних матеріалів, одержаних відцентровим армуванням литих сплавів, які піддають ПЕО забезпечує збільшення утримувальної здатності оксидного покриття. Результати моделювання руху електроліту, температури в міжелектродному просторі електрохімічної комірки та розподілу температур у деталях дозволили обгрунтувати режими ПЕО. Вибрано режими різання, пластичного деформуванням деталей із алюмінієвих сплавів і параметри шорсткості перед ПЕО. Досліджено вплив технологічних параметрів процесу ПЕО (складу електроліту, струмових режимів тощо) на фізико-механічні властивості та жаростійкість покриттів. Вивчено напружено-деформований стан оксидного

покриття на алюмінієвій основі. Проведено модернізацію установки для ПЕО в проточному електроліті деталей із алюмінієвих сплавів, яка дозволяє регулювання форми електричного сигналу, частоти напруги, густини та співвідношення анодного і катодного струму та підвищити енергоефективності ПЕО.

Дослідження складу ПЕО покриттів показали наявність високо температурної фази оксиду алюмінію. Встановлено, що в ПЕО покриттях виникають залишкових напруження стиску та визначено допустимий рівень напружень у вкритих зразках за різних видів навантаження. Випробовування зразків з ПЕО покриттями на жаростійкість та на фрикційну жаростійкість показали їх високу роботоздатність. Обґрунтувано та вибрано план проведення технологічних експериментів та оптимізовано параметри процесу ПЕО для забезпечення одержання зносостійких покриттів. Досліджено режими механічної обробки (алмазного шліфування) ПЕО покриттів надеталях із алюмінієвих сплавів для одержання заданої шорсткості поверхні. Виготовлено дослідні взірці-прототипи деталей з оксидними жаростійкими покриттями, сформованими за оптимальних технологічних режимів ПЕО. Результати стендових випробовувань деталей з покриттями показали підвищенння ресурсу роботи порівнянно із серійними. Розроблено технологічний процес формування жаростійких ПЕО покриттів на деталях із алюмінієвих сплавів і рекомендації щодо практичного застосування.

Дослідження виконано завдяки фінансуванню Національним фондом досліджень України (National Research Foundation of Ukraine), грант № 2023.04/0160, (0124U003748): «Розробка технології формування жаростійких покриттів методом плазмового електролітичного оксидування на деталях авіаційної та ракетно-космічної техніки».

Список літератури

1. Introduction to Plasma Electrolytic Oxidation-An Overview of the Process and Applications / Simchen, F., Sieber, M., Kopp et al. // Coatings. – 2020. – 10(7), 628. https://doi.org/10.3390/coatings10070628

2. Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) coatings on aluminum alloy 2024: A review of mechanisms, processes, and corrosion resistance enhancement / Gamba, M., Cristoforetti, A., Fedel, M. et al. // Applied Surface Science Advances. – 2025. – 26, 100707. https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2025.100707

2. 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. – 6(1), P. 146–167. https://doi.org/10.3390/ceramics6010010

УДК 338:658.5

Польнікова І.С.
студентка, НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна

ВИСОКОШВИДКІСНЕ ФРЕЗЕРУВАННЯ

Високошвидкісна обробка – це методика фрезерування, що базується на дуже швидких режимах різання. Процедура супроводжується мінімальним тиском на заготовку, забезпечує оперативне видалення матеріалу при незначному зниженні точності.

Найбільш важливим фактором у ВСО є перерозподіл тепла в зоні різання. При невеликих перетинах зрізу в даному діапазоні швидкостей основна маса тепла концентрується в стружці, не встигаючи переходити в заготовку. Саме це дозволяє проводити обробку загартованих сталей, не побоюючись відпуску поверхневого шару. Але основа ВСО – це малий переріз зрізу, що знімається з високою швидкістю різання, і реалізується простим завданням малих кроків між проходами. Виключення - коли йде прохід повною шириною фрези, але це можна вирішити шляхом використання трохоідальної обробки, коли в процесі врізання фреза рухається по колу.

Щоб підвищити ефективність ВСО, треба забезпечити наступні вимоги: оптимізація параметрів різання, налаштовувати швидкість шпинделя, швидкість подачі та глибину різання для оптимальних умов різання. Використовувати високі оберти шпинделя та легкі різи для ефективного видалення матеріалу. Обирати високопродуктивні твердосплавні кінцеві фрези з покриттям, спеціально розробленим для обробки. Впроваджувати програму регулярного огляду та технічного обслуговування інструменту, щоб завчасно виявити ознаки зносу або пошкодження, запобігти виходу інструмента з ладу та забезпечити постійну роботу. Впроваджувати адаптивні системи керування, які динамічно регулюють параметри різання на основі умов реального часу, забезпечуючи оптимальну ефективність. Використовувати системи охолодження високого тиску для ефективного розсіювання тепла та продовження терміну служби інструменту. Оптимізувати подачу охолоджуючої рідини в зону різання, щоб покращити відведення стружки та зменшити термічний вплив на заготовку. забезпечити надійне та стабільне кріплення заготовки, щоб мінімізувати вібрацію та підвищити точність обробки, також можливе використання вдосконалених рішень для кріплення, наприклад вакуумних столів або магнітних затискачів, щоб покращити стабільність деталей. Імітувати траєкторії інструменту за допомогою програмного забезпечення кулачка для виявлення потенційних проблем перед фактичною обробкою. Запровадити перевірку траєкторії інструменту в процесі, щоб виявити зіткнення, забезпечити точність і запобігти помилкам. Використовувати датчики вібрації та температури, щоб контролювати стан інструменту та виявляти ознаки зносу або поломки

інструменту або впровадити системи керування ресурсом інструменту, які автоматично регулюють параметри різання або оперативні зміни інструменту на основі даних у реальному часі. Оптимізувати системи відведення стружки, щоб запобігти накопиченню стружки та повторному нарізанню, забезпечуючи безперебійну обробку. Впроваджувати ефективні стратегії управління стружкою, щоб підтримувати чисте середовище різання.

Також при високошвидкісній обробці на верстаті з ЧПК потрібно забезпечити: достатню жорсткість заготовки та інструменту; вивірене балансування фрези, деталі та рухомих частин обладнання; тестування гармоніки; контроль навантаження на інструмент на всіх етапах роботи; короткий крок подачі фрези; грамотний підбір матеріалу.

Серед переваг високошвидкісного фрезерування є:

- за рахунок високих швидкостей обробки можна досягти значного скорочення часу обробки деталей;
- менші подачі і більш високі швидкості дозволяють домогтися більш точної обробки;
- завдяки високій швидкості обробки і малим подачам можна домогтися гладкої поверхні деталей,
- використання спеціалізованих інструментів і управління процесом обробки дозволяють зменшити знос інструменту.

Серед недоліків високошвидкісного фрезерування є:

- підвищений знос інструменту;
- високі вимоги до обладнання та кваліфікації майстра;
- значний ризик виникнення вібрацій.

Рекомендації по оптимізації:

- при роботі з деталями складного профілю варто зменшити значення кроку по осі Z. Це знизить ризик видалення збільшеного об’єму матеріалу при кутовому врізанню фрези;
- досягати цільової глибини врізання варто покроково. В результаті вдасться створити рівномірний припуск для фінішної обробки та знизити навантаження на інструмент;
- відходити від траєкторії рекомендовано по дузі, в такому випадку спостерігається плавна зміна параметрів взаємодії та значне розвантаження інструменту.

Список літератури

1. Високошвидкісне фрезерування та традиційне фрезерування та EDM. URL: http://ua.injectmould.com/info/high-speed-milling-and-traditional-milling-and-38063233.html (дата звернення 02.11.2025)

2. Високошвидкісне фрезерування алюмінію. URL: https://ua.acoin-metal.com/cnc-milling-parts/high-speed-aluminum-milling-factory.html (дата звернення 03.11.2025)

УДК 621.74.045:620.1:669.245

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

Педаш О. О.
канд. техн. наук, АТ «Мотор Січ», м. Запоріжжя, Україна

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

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

ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛИТИХ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ АВІАЦІЙНОГО ТА ЕНЕРГЕТИЧНОГО МАШИНОБУДУВАННЯ

Литі лопатки турбін є типовими представниками відповідальних деталей силових агрегатів авіаційного та енергетичного машинобудування і виготовляються методами рівноосної та спрямованої кристалізації. Вони виготовляються із жароміцних нікелевих сплавів, що характеризуються дуже складною системою легування.

На сьогодні актуальною є задача покращення рівня фізико-механічних та експлуатаційних властивостей виробів з сучасних ливарних жароміцних нікелевих сплавів не за рахунок подальшого перевантаження їх додатковим легуванням, а застосуванням різноманітних технологічних заходів.

Раніше проведені вітчизняні та закордоні дослідження показали позитивний вплив модифікування рідкоземельними і лужноземельними металів, а також тугоплавкими ультрадисперсними частинками. Проте зв'язок комплексного використання цих факторів остаточно не встановлено.

Одним з ефективних способів виправлення ливарних дефектів у відповідальних виливках, є гаряче ізостатичне пресування (ГІП). Одним з основних методів технологічного поліпшення структури та властивостей литих виробів є термічна обробка.

Також все більш гостро постає проблема повторного використання відходів вартісних матеріалів.

Сплав ЖС3ДК-ВІ є одним із найпоширеніших для виготовлення литих лопаток вентиляторних турбін методом рівноосної кристалізації, що працюють при температурах до 900 °С.

Проведеними розрахунково-аналітичними дослідженнями визначено найважливіші параметри, що характеризують структурну і фазову стабільність сплаву на різних рівнях легування.

Встановлено, що у всьому діапазоні легування, наведено на слайді, значення основних параметрів несуттєво монотонно знижуються, що свідчить про високий рівень структурної стабільності сплаву ЖС3ДК-ВІ.

Отримані результати свідчать про достатню стабільність сплаву ЖС3ДК-ВІ та його загальну придатність для широкого застосування модифікування різними комплексами.

Розрахунками визначено критичні температури, необхідні для обрання режимів ГІП і термічної обробки, найважливіші параметри короткочасної та тривалої міцності, що характеризують працездатність ливарного жароміцного нікелевого сплаву ЖС3ДК-ВІ.

Проведеними дослідженнями показано, що якість виливків із жароміцного нікелевого сплаву ЖС3ДК-ВІ, отриманих з використанням у шихті 50%-нвого вороття (після попереднього переплаву із застосуванням високотемпературної обробки розплаву), після ГІП та термічної обробки за стандартним режимом відповідає вимогам ОСТ 1.90.126-85.

У процесі ГІП лопаток при температурі 1210 °С і тиску 160 МПа відбувається заліковування мікропор і рихлот, що не виходять на поверхню деталей (знаходяться у внутрішніх об’ємах металу). ГІП перед стандартною термічною обробкою позитивно впливає на комплекс фізико-механічних та експлуатаційних властивостей відповідальних литих виробів із жароміцних нікелевих сплавів для авіаційних і енергетичних силових установок.

Досліджено виливки з жароміцного нікелевого сплаву ЖС3ДК-ВІ, модифікованого ультрадисперсним порошком карбонітриду титану; ітрієм; ітрієм у комплексі з карбонітридом титану або ніобієм при різних співвідношеннях присадок у розплав Ni-Y лігатури, [Ti+Ti(C,N)] і Nb. Хімічний склад, механічні та жароміцні властивості досліджуваних зразків після ГІП та стандартної ТО задовільні та відповідають вимогам ОСТ 1.90.126-85. Мікроструктура зразків, відлитих зі сплаву ЖС3ДК-ВІ за всіма варіантами (після ГІП та ТО), характерна для нормально термообробленого стану сплаву ЖС3ДК-ВІ. Карбіди та карбонітриди виділяються у вигляді дискретних глобулярних частинок, переважно рівномірно розподілених в об'ємі металу.

Встановлено найкращий ефект від комплексного модифікування ітрієм і карбонітридом титану з присадками у розплав [Ti+Ti(C, N)] – 0,075% і Ni-Y лігатури – 0,136%, що забезпечую формування найбільш сприятливої структури і значно кращі механічні та жароміцні властивості нікелевого сплаву ЖС3ДК-ВІ. В цьому випадку спостерігається подрібнення зерна, карбіди та карбонітриди виділяються у вигляді дискретних глобулярних частинок, рівномірно розподілених в об'ємі металу; межі зерен тонкі з наявністю на межах карбідів розміром, що переважно, не перевищує ~3 мкм. Це, ймовірно, сприяло підвищенню ударної в'язкості до значень 58,8 Дж/см^2.

УДК 621.74.045:620.1:669.245

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

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

Качалов М. Б.
аспірант, НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ВІДПОВІДАЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ НАЗЕМНИХ СИЛОВИХ АГРЕГАТІВ

Найбільш поширеним методом виготовлення відповідальних деталей із жароміцних нікелевих сплавів для авіаційного та енергетичного машинобудування є лиття.

Для забезпечення вимог до матеріалів сучасних силових агрегатів постійно розробляють нові сплави. При цьому перспективним напрямом є підвищення рівня експлуатаційних та економічних показників деталей та готових виробів сучасними технологічними методами.

Серед таких операцій поширені високотемпературна обробка розплаву, модифікування рідкісноземельними металами, карбідоутворюючими елементами, ультрадисперсними тугоплавкими частинками, а також різними комплексами модифікаторів. Також відомий метод армування матеріалу литих виробів.

Для усунення мікропористості в готових виливках застосовують гаряче ізостатичне пресування (ГІП), суть якого полягає у всебічному стисканні виливків у середовищі спеціальної рідини або газу при високих температурах. Барометрична обробка не видаляє дефекти, що сполучаються з поверхнею виливка.

Для підвищення економічності виробів із вартісних нікелевих сплавів у шихті повторно використовують технологічне повернення з обов’язковим застосуванням ряду перерахованих технологічних операцій у процесі їх виготовлення.

Останніми роками для виготовлення деталей із високолегованих жароміцних нікелевих сплавів все більш широко застосовуються адитивні технології. Це дозволяє докорінно усунути характерні для лиття дефекти ліквацийного характеру. Однак при цьому загострюються проблеми залишкової пористості матеріалу після сплавлення частинок сплаву. Для нівелювання цього факту також застосовують ГІП виробів, отриманих 3Д принтингом.

УДК 621.914.22

Тищенко М. С.
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

ВАР'ЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ШПИНДЕЛЯ В УМОВАХ ВИНИКНЕННЯ АВТОКОЛИВАНЬ

Автоколивання, що виникають у процесі різання, призводять до погіршення якості обробленої поверхні та прискореного зношування ріжучого інструменту. Основними типами автоколивань при точінні є регенеративні та тангенціальні. Ці автоколивання виникають одночасно і перебувають у взаємозв'язку, тому їх називають пов'язаними.

У більшості досліджень основна увага приділяється регенеративному ефекту, як джерелу автоколивань, при цьому інші види коливань та їх джерела часто не розглядаються. Одним із найбільш ефективних способів пригнічення автоколивань при точінні вважається застосування технології варіювання швидкості обертання шпинделя (Spindle Speed Variation (SSV)). Наявні дослідження зосереджуються на визначенні оптимального співвідношення між амплітудою та частотою варіювання SSV, що забезпечує максимальне загасання автоколивань. Але до цього часу досконало не досліджений окремий вплив SSV на різні види автоколивань.

В роботі [1, 2] розглянуто вплив SSV на загасання автоколивань. Встановлено, що збільшення діапазону зміни частоти обертання шпинделя понад 20 % від середнього значення незначно впливає на ефективність загасання автоколивань. Для зменшення вібрацій під час різання з більшими глибинами або за вищих швидкостей необхідна більша швидкість варіювання частоти обертання шпинделя. На думку авторів [3], ефективність загасання вібрації знижується, якщо різниця між поточною та попередньою швидкістю обертання шпинделя незначна. Тому параметри варіювання необхідно підбирати таким чином, щоб мінімізувати це обмеження та забезпечити стабільне загасання автоколивань протягом усього процесу різання. Однак в цих роботах представлені експериментальних дослідженнях пов'язаних автоколивань.

Для проведення експериментального дослідження використовували різці-осцилятори з одним та двома ступенями свободи [4]. Експерименти проводили на токарному верстаті с ЧПК мод. Zenitech WL 320. Сигнали з безконтактних датчиків надходили на багатоканальний аналогово-цифровий перетворювач (модель L-Card E140), після чого вони, в цифровій формі, передавалися на персональний комп'ютер у вигляді осцилограм. На осцилограмах вимірювали амплітуди коливань різальної кромки відносно осей x та z.

Результати досліджень з використанням різних різців-осциляторів підтвердили ефективність режиму SSV у питаннях загасання автоколивань, проте ступінь загасання різних типів коливань виявилася неоднаковою: на регенеративні автоколивання ефект був невеликий, тоді як на тангенціальні автоколивання загасали майже повністю.

Враховуючи те, що застосування режиму SSV при точінні малоефективне для загасання регенеративних автоколивань, тому його доцільно комбінувати з іншими методами, наприклад, зі збільшенням площі тертя на задній поверхні різця.

Список літератури

1 Active suppression of chatter by programmed variation of spindle speed / T. Takemura, T. Kitamura, T. Hoshi, K. Okushimo // CIRP Ann. – 1974. – 23(1). – P. 121–122.

2. Parameter identification for linear model of the milling process using spindle speed variation / K. Takahei, S. Miwa, E. Shamoto, N. Suzuki // Precision Engineering. – 2023. – Vol. 79. – P. 16–33. https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2022.08.011

3. Proposal of novel chatter stability indices of spindle speed variation based on its chatter growth characteristics / S. Nam, T. Hayasaka, H. Jung, E. Shamoto // Precision Engineering. – 2020. – Vol. 62. – P. 121–133. https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.11.018

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 621.941:004.85

Приходько О. С.
канд. техн. наук, доцент, ЛНТУ, м. Луцьк, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЯКОСТІ ТА СТАБІЛЬНОСТІ ПРОЦЕСУ ТОКАРНОЇ ОБРОБКИ

Надійність деталей авіаційних двигунів напряму залежить від якості їхніх поверхонь, яка формується на етапах механічної обробки. Застосування сучасних методів машинного навчання дозволяє доповнити перевірені часом традиційні підходи, надаючи інструменти для більш тонкого налаштування режимів різання та пошуку оптимального балансу між якістю та продуктивністю. Однак, аналіз наукових праць [1-3] показує, що більшість досліджень фокусуються на прогнозуванні лише середнього значення шорсткості, тоді як для відповідальних деталей не менш важливим є стабільність та повторюваність процесу.

Метою даної роботи є розробка методики, що дозволяє моделювати одночасно два критерії: середню шорсткість та стабільність процесу, що характеризується розкидом значень шорсткості. Дослідження базується на відкритому наборі даних проекту MaRoReS [4], що містить результати 68 експериментів по токарній обробці високоміцної сталі 42CrMo4+QT. Порівняно два підходи: емпіричну степеневу модель, на основі лінійної регресії, та модель машинного навчання Random Forest.

В результаті проведеного регресійного аналізу було отримано наступну емпіричну формулу для прогнозування середньої шорсткості поверхні R_a:

$$R_a = 24.8240 \cdot r^{-0.4560} \cdot d^{-0.1811} \cdot v^{-0.5643} \cdot f^{0.7435} \qquad (1)$$

де r – радіус при вершині інструменту, d – глибина різання, v – швидкість різання та f – подача.

Модель машинного навчання показала кращу точність прогнозування (R^2=0.590 проти 0.531 для регресії) та виявила домінуючий вплив подачі на середню шорсткість, тоді як глибина різання мала мінімальний ефект.

Додатково побудовано модель для оцінки стабільності процесу, що дозволила визначити зони нестабільних режимів. Встановлено, що процес втрачає стабільність при низьких швидкостях різання (v < 95 м/хв) та крайніх значеннях подач. Встановлено також, що більший радіус вершини r = 0.8 мм (проти 0.4 мм) знижує варіабельність шорсткості більш ніж на 60%.

Стійкість запропонованого ML-підходу було додатково перевірено на незалежному наборі даних [5]. Тестування підтвердило, що модель "RandomForest" здатна виявляти корисні закономірності ($R^2 \approx 0.5$) навіть в умовах, де класичні регресійні моделі виявляються практично непрацездатними ($R^2 < 0.1$)

Висновки. Розроблено та валідовано методику прогнозування параметрів якості та стабільності токарної обробки на основі алгоритму «Випадковий ліс». Доведено перевагу моделей машинного навчання над класичними регресійними методами за точністю прогнозування та здатністю виявляти приховані закономірності процесу. Аналіз факторів показав, що подача є основним параметром, що визначає шорсткість поверхні, тоді як стабільність процесу залежить переважно від швидкості різання та геометрії інструменту, зокрема радіуса його вершини.

Список літератури

1. Prediction of surface roughness for CNC turning of AISI 1030 steel: A machine learning approach / Sharma H., Sahay A., Kumari S., Dutt A. K. // Journal of Metallurgy and Materials Science. – 2021. – Vol. 63, No. 1–2. – P. 33-40. ISSN 0972-4257. URL: https://jmms.nmlindia.org/wp-content/uploads/2023/01/JMMS-vol-63-issue-1-2-paper-04.pdf

2. Optimization of surface roughness in turning using statistical analysis and machine learning / Samin R., Luqman N., Ismail M., Sulaiman M. // International Journal of Modern Manufacturing Technologies. – 2025. – Vol.17, No. 1. – P. 70–84. DOI: 10.54684/ijmmt.2025.17.1.70

3. Reddy B. S. Surface roughness prediction techniques for CNC turning / Reddy B. S., Padmanabhan G., Reddy K.V.K. // Asian Journal of Scientific Research. – 2008. – Vol.1, № 3. – P. 256–264. DOI: 10.3923/ajsr.2008.256.264

4. MaRoReS (Machining, Roughness and Residual Stresses generated in turning of 42CrMo4+QT steel) [Електронний ресурс] / Díaz-Salamanca D., Álvarez Á., Muñiz Calvente M. et al. – Version 1. – Mendeley Data, 11 Apr 2024. DOI: 10.17632/z9w23xvhbt.1.

5. Doniavi A. Empirical Modeling of Surface Roughness in Turning Process of 1060 Steel Using Factorial Design Methodology / Doniavi A., Eskandarzade M., Tahmasebian M. // Journal of Applied Sciences. – 2007. – Vol. 7, No. 17. – P. 2509–2513. DOI: 10.3923/jas.2007.2509.2513

УДК 621.9.025:669.295

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

Федоров І. А.
студент, НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна

ФОРМУВАННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ТИТАНОВИХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ВИСОКОШВИДКІСНОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ ТА ВІБРОПОЛІРУВАННІ

Титанові сплави широко застосовуються для виготовлення деталей подвійного призначення завдяки своїм унікальним властивостям. Однак механічна обробка титанових сплавів пов'язана зі значними труднощами через низьку теплопровідність, високу міцність та схильність до адгезії. Стан поверхневого шару має визначальний вплив на навантажувальну здатність деталей, особливо при циклічних навантаженнях. Аналіз сучасних досліджень показує, що на втомну міцність титанових сплавів впливає комплекс параметрів поверхневого шару: геометричні (шорсткість), механічні (залишкові напруження) та металургійні характеристики, при цьому механічний параметр, зокрема залишкові напруження, має найбільш значний вплив на експлуатаційні характеристики [1, 2].

Найбільш критичною формоутворюючою операцією для деталей компресорів, виготовлених за технологією твердофазної металургії з порошкових сумішей, є високошвидкісне стрічкове фрезерування аеродинамічних поверхонь. При високошвидкісному різанні титанових сплавів виникає ряд особливостей: значні сили різання, що руйнують поверхневий шар, недостатнє відведення теплоти з зони різання внаслідок низької теплопровідності, адгезія оброблюваного матеріалу до ріжучої крайки інструменту. Несприятливі режими різання можуть призводити до наклепування поверхневого шару та формування розтягуючих напружень, що негативно впливає на втомну міцність виробів [3, 4]. Проблема формування сприятливих стискаючих залишкових напружень у поверхневому шарі деталей з титанових сплавів, отриманих за порошковими технологіями, при комплексному застосуванні механічних та оздоблювальних методів обробки залишається недостатньо дослідженою.

Метою даної роботи було встановлення закономірностей формування залишкових напружень у поверхневому шарі зразків з титанового сплаву, виготовлених за технологією твердофазної металургії з порошкової суміші, при механічній та оздоблювальній обробці. Для досягнення мети були вирішені задачі дослідження залишкових напружень у поверхневому шарі зразків при різних режимах високошвидкісного фрезерування та

віброполірування. Дослідження залишкових напружень виконувались методом свердління малих отворів відповідно до ASTM E837 на обладнанні SINT RESTAN MTS 3000. Пошарове свердління з дискретністю 10 мкм дозволило дослідити розподіл залишкових напружень у поверхневому шарі на глибині до 200 мкм.

Для встановлення закономірностей формування напруженого стану поверхневого шару був реалізований повнофакторний експеримент з двома незалежними факторами (швидкість різання V = 62–314 м/хв та подача на зуб S_z = 0,05–0,15 мм/зуб), варійованими на двох рівнях при постійній глибині різання 0,15 мм. Експериментальні дослідження показали, що у поверхневому шарі формувались стискаючі залишкові напруження з максимальними значеннями у поверхневому шарі на глибині 25–35 мкм незалежно від параметрів високошвидкісного фрезерування. Регресійний аналіз (R^2=0,85) показав різноспрямований вплив основних технологічних параметрів: збільшення швидкості різання зменшувало значення стискаючих залишкових напружень, тоді як збільшення подачі на зуб супроводжувалось їх зростанням. Ці явища були пояснені переважним впливом силового фактору над тепловим при високошвидкісному фрезеруванні [5].

На основі результатів досліджень були визначені різні комбінації оптимальних параметрів для чорнової обробки (пріоритет продуктивності: V=314 м/хв, S_z=0,15 мм/зуб) та оздоблювальної обробки (максимізація сприятливих стискаючих залишкових напружень: V=63 м/хв, S_z=0,15 мм/зуб, що забезпечує максимальні стискаючі залишкові напруження приблизно -380 МПа). Подальше віброполірування не тільки значно знизило шорсткість поверхні з Ra 0,36-0,48 мкм до Ra 0,18–0,22 мкм, але й підвищило рівні стискаючих залишкових напружень у поверхневому шарі. Результати розширюють наукові основи технології механічної обробки титанових сплавів та надають цінну інформацію для розробки технологічних процесів виготовлення критичних компонентів газотурбінних двигунів з метою підвищення їх втомної міцності та експлуатаційної надійності.

Список літератури

1. Moussaoui, K., Mousseigne, M., Senatore, J., Chieragatti, R., Lamesle, P.: Influence of milling on the fatigue lifetime of a Ti6Al4V titanium alloy. Metals, 5(3), 1148-1162 (2015). DOI: 10.3390/met5031148

2. Lai, X., Wang, Y., Wang, D., Zhao, G., Yang, Y.: Research on Surface Integrity and Fatigue Properties in the Turning of TC17 Titanium Alloy Based on the Response Surface Method. Materials, 15(22), 7180 (2023). DOI: 10.3390/ma16227180

3. Yadav, Sh., Pawade, R.: Manufacturing Methods Induced Property Variations in Ti6Al4V Using High-Speed Machining and Additive Manufacturing (AM). Metals, 13(2), 287 (2023). DOI: 10.3390/met13020287

4. Pavlenko, D., Dvirnyk, Y., Przysowa, R.: Advanced materials and technologies for compressor blades of small turbofan engines. In: 10th EASN International Conference on Innovation in Aviation and Space, EASN 2020, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1024(1), 012061 (2021).

5. Matuszak, J., Zaleski, K., Zyśko, A.: Investigation of the Impact of High-Speed Machining in the Milling Process of Titanium Alloy on Tool Wear, Surface Layer Properties, and Fatigue Life of the Machined Object. Materials, 16(15), 5361 (2023).

УДК 629.7.036.75:004.8

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

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

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

ЗАСТОСУВАННЯ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРА ГТД

Покращення основних експлуатаційних характеристик газотурбінних двигунів (ГТД), таких як коефіцієнт корисної дії, ресурс, надійність, економічність та екологічність, є важливим напрямком розвитку авіаційної техніки. Експлуатація двигунів в нерозрахункових умовах, таких як високі рівні запиленості та вологості, впливає на повітряний тракт ГТД, що призводить до зміни геометричних параметрів і якості поверхні лопаток компресора. Ці зміни суттєво впливають не лише на аеродинамічні характеристики лопаток, але й на їх резонансні та вібраційні частотні характеристики та втомну міцність, що знижує їх запас динамічної міцності [1]. Експлуатація літальних апаратів у регіонах з високою концентрацією атмосферного пилу та піску (понад 1 г/м³) призводить до погіршення основних характеристик двигуна. Зокрема, відбуваються зміни частоти коливань робочих лопаток, зростання вібраційних напружень та втрата газодинамічної стабільності компресора [2].

Поява резонансних явищ у робочому діапазоні частот значно збільшує напруження в лопатках, викликаючи їх руйнування та передчасне виведення двигуна з експлуатації. Пилова ерозія є основною причиною погіршення параметрів компресора. Компоненти компресора, особливо робочі лопатки, зазнають максимального зносу. Інтенсивність зносу через ерозію прямо пропорційна концентрації абразивних частинок у всмоктуваному повітряному потоці.

Основним завданням дослідження з точки зору аналізу даних є побудова моделей залежності частот власних коливань пера лопатки від досліджуваних факторів. Вихідними даними були результати вимірювань геометричних параметрів (30 точок на лопатку) та власних частот (3 частоти на лопатку) для трьох наборів натурних лопаток компресора ГТД (близько 100 лопаток загалом) [3, 4].

У дослідженні було застосовано методи машинного навчання для розробки прогнозних моделей. Проведено розвідувальний аналіз даних, включаючи перевірку нормальності розподілу змінних, оцінку кореляцій між незалежними та залежними змінними, а також візуалізацію вихідних даних у вигляді гістограм. Для прогнозування придатності лопаток були побудовані логістичні регресійні моделі у два етапи: на першому етапі на основі геометрії лопатки (точність 65%), на другому – на основі частот власних коливань лопаток (точність 95%). Модель другого етапу показала високу надійність і дозволяє істотно знизити трудомісткість операції контролю, оскільки дає можливість відмовитись від контролю геометрії лопаток [5].

Для оцінки впливу геометрії на частоти коливань було розроблено регресійні моделі множинної регресії з використанням методів машинного навчання. Оцінено п'ять моделей різного ступеня складності: лінійна регресія, метод k найближчих сусідів, випадковий ліс, градієнтний бустинг та метод базового вектору. Найкращі результати показала модель випадкового лісу. Проведено оптимізацію параметрів моделі за допомогою пошуку по сітці, визначено оптимальну кількість дерев у моделі. Для кожної з трьох частот власних коливань (f_1, f_2, f_3) побудовано окремі моделі з високою точністю прогнозування. Виконано інтерпретацію моделей з визначенням важливості ознак (Feature Importance) та застосуванням методу LIME (Locally Interpretable Model-agnostic Explainer) для пояснення індивідуальних прогнозів [6].

Результати проекту показали, що розроблений код на Python дозволяє виконувати розвідувальний аналіз вихідних даних про геометрію лопаток компресора та їх власні частоти. Виявлено сильну кореляцію між частотами власних коливань та геометрією лопаток. Застосування машинного навчання дозволило створити логістичну модель для точної оцінки геометрії лопаток в межах допустимих меж, а також регресійну модель для оцінки зміни власних частот лопаток на основі їх геометрії. Побудована модель може бути використана для оцінки граничного зносу пера лопаток компресора за основними частотами власних коливань, а також для діагностики проблем, пов'язаних з лопатками, під час виробництва, ремонту або експлуатації газотурбінних двигунів. Отримані математичні моделі також дозволяють контролювати профіль лопатки під час виробництва.

Список літератури

1. Dvirnyk Y. Determination of Serviceability Limits of a Turboshaft Engine by the Criterion of Blade Natural Frequency and Stall Margin / Y. Dvirnyk, D. Pavlenko, R. Przysowa // Aerospace 2019, 6, 132. DOI: 10.3390/aerospace6120132

2. Двірник Я.В. Граничний стан осьового компресора газотурбінного двигуна, який експлуатувався в умовах запиленої атмосфери / Я.В. Двірник, Д.В. Павленко // Системи озброєння і військова техніка. – 2018. – № 1/53. – С. 97–107.

3. Двірник Я.В. Оцінка граничного стану лопаток компресора вертолітних газотурбінних двигунів за власною частотою коливань / Я.В. Двірник, Д.В. Павленко // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2016. – № 7/134. – С. 79–83.

4. Бабенко О.М. Прогнозування власних частот коливань лопаток компресора за вищими формами при налагодженні частот основного тону / В.О. Богуслаєв, О.М. Бабенко, А.А. Олійник, Д.В. Павленко, Є.Я. Кореневський // Вісник двигунобудування. – 2009. – № 1. – С. 10–14.

5. Бабенко О.М. Вплив тривалої експлуатації авіаційних ГТД на вібраційні частотні характеристики лопаток компресора / В.О. Богуслаєв, О.М. Бабенко, Д.В. Павленко, Є.Я. Кореневський // Вісник двигунобудування. – 2007. – № 2. – С. 54–60.

6. Бабенко О.М. Зниження рівня змінних напружень в матеріалі лопаток компресора технологічними методами при наявності резонансного явища / О.М. Бабенко, Є.Я. Кореневський, Д.В. Павленко // Вісник двигунобудування. – 2007. – № 1. – С. 77–81.

УДК 621.45.037

Собченко С. В.
аспірант кафедри ТАД НУ «Запорізька Політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Уланов С. О.
доктор філософії, доцент, НУ «Запорізька Політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ЛОПАТОК НАПРАВЛЯЮЧОГО АПАРАТУ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

Сучасні тенденції розвитку авіаційного двигунобудування пов’язані з упровадженням інтелектуальних систем моніторингу технічного стану, що базуються на технологіях штучного інтелекту (ШІ), машинного навчання та цифрових двійників (Рисунок 1). Одним із перспективних напрямів є використання ШІ для прогнозування ресурсу авіаційних двигунів та оптимізації процесів відновлення елементів конструкції двигунів, зокрема лопаток направляючого апарату (НА), які істотно впливають на ефективність і надійність роботи газотурбінних двигунів.

Розглянуто можливості застосування нейронних мереж для автоматичного розпізнавання пошкоджень лопаток за зображеннями (Рисунок 2) та параметрами вібраційного спектра, що дозволяє оперативно визначати характер дефектів без демонтажу вузла. Запропоновано концепцію цифрового двійника вузла НА, який поєднує дані експлуатаційного моніторингу, моделювання напружено-деформованого стану та аналітику ШІ для оцінки залишкового ресурсу.

Застосування методів глибокого навчання при оптимізації технологічних процесів ремонту та відновлення покриттів, що припрацьовуються, з метою зменшення термічних деформацій, запобігання появі тріщин і підвищення зносостійкості поверхонь.

Інтеграція таких інтелектуальних підходів у систему Predictive Maintenance (обслуговування за технічним станом) дозволяє перейти від регламентного контролю до динамічного управління ресурсом, що забезпечує зниження витрат, підвищення безпеки польотів і продовження міжремонтного терміну служби двигуна.



Рисунок 1 – Створення цифрового двійника авіаційного двигуна

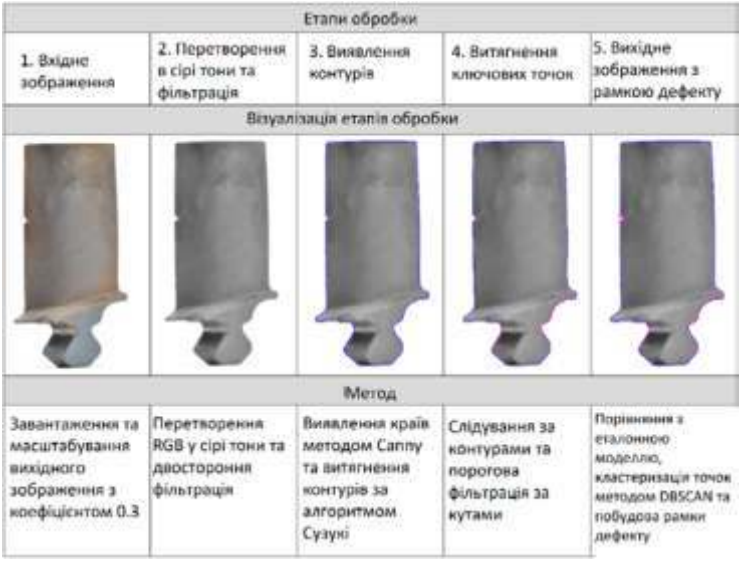


Рисунок 2 – Автоматичне розпізнавання пошкоджень лопаток за зображенням

Список літератури

1. How Digital Twin technology can enhance Aviation [Electronic resource] Mode of access: https://www.rolls-royce.com/media/our-stories/discover/2019/how-digital-twin-technology-can-enhance-aviation.aspx?utm_source=chatgpt.com – Title from screen

УДК 621.793.7

Івашків В. Р.
канд. техн. наук, н.с, ФМІ НАН України ім. Г.В. Карпенка,
м. Львів, Україна
Чучман М.Р.
канд. техн. наук, с.н.с, ФМІ НАН України ім. Г.В. Карпенка,
м. Львів, Україна
Омельченко С.А.
АТ «Івченко-Прогрес», м. Запоріжжя, Україна
Торба Ю.І.
канд. техн. наук., ст. досл., АТ «Івченко-Прогрес», м. Запоріжжя, Україна
Неманежин Є.О.
PhD, АТ «Івченко-Прогрес», м. Запоріжжя, Україна

ХІМІЧНЕ ПОЛІРУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ АВІАЦІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Хімічне полірування є ефективним методом фінішної обробки титанових та нержавіючих сплавів, що забезпечує отримання гладкої, блискучої та корозійностійкої поверхні без механічного впливу. Простота реалізації процесу й можливість одночасного полірування деталей складної геометрії зумовлюють його застосування в авіаційній промисловості.

У роботі досліджено хімічне полірування корозійностійких конструкційних матеріалів авіаційного призначення — титанового сплаву Е1698ВД та нержавіючої сталі ДИ-3Ш. Зразки у вигляді прямокутних призм (10×10×20 мм) полірували в кислотних розчинах різного складу (табл. 1).

Таблиця 1 – Склад розчинів для хімічного полірування (г/л)

Розчин №1		Розчин №2		Розчин №3		Розчин №4	
HNO_3 (56%)	620 – 830	H_2SO_4	100 – 110	HNO_3	210	HNO_3	425 – 500
HF (45%)	160 –170	HNO_3	110 – 140	H_3PO_4	1445	AcH*	600 – 700
		HCl	50 – 60			HCl	58,5

* CH_3COOH

Список літератури

1. Yanqiu Xu, Yachun Mao, Muhammad Hammad Ijaz, Mohamed E. Ibrahim, Shiru Le, Fang Wang, Jie Jiang, Dazhao Chi, Maozhong An, Shuhuan Song, Yuhui Huang, Yuhan Zhang. Review—Principles and Applications of Electrochemical Polishing // Journal of The Electrochemical Society. – 2024. – Vol. 171. – P. 093506.

УДК 621.452

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

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

Сахнюк Н. В.
канд. техн. наук, доцент, інженер АК АТ «Мотор Січ», м. Запоріжжя, Україна

Гембель В. Й.
зав. лаб., НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна

Пашечко М. І.
д-р техн. наук, професор, Люблінський технологічний університет, м. Люблін, Польща

ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ КОНТАКТНИХ ПОВЕРХОНЬ ХВОСТОВИКІВ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРІВ ГТД

Хвостовики робочих лопаток компресорів належать до найбільш навантажених елементів конструкції лопаток. У процесі експлуатації на них діють динамічно змінні чинники (тиск, температура, амплітуда й частота взаємних переміщень), а також корозійні процеси. Сукупність цих факторів визначає стан поверхневого шару, від якого значною мірою залежить загальна довговічність лопаток.

Високі контактні тиски спричиняють прискорений знос крайніх ділянок хвостовика, що призводить до збільшення зазору в замковому з'єднанні. Це, своєю чергою, провокує зростання вібраційних напружень у пері лопатки, підвищуючи ризик її втомного руйнування [1]. Раніше під час капітального ремонту двигунів лопатки з подібними дефектами підлягали заміні на нові, що є економічно невиправданим.

Мета роботи – розробка та обґрунтування технології відновлення несучих поверхонь хвостовиків лопаток компресорів. Об'єктом дослідження обрано лопатки II-ї ступені КВТ двигуна Д-36 (титановий сплав ВТ8).

Аналіз стану лопаток виявив нерівномірний знос уздовж хвостовика, повну відсутність покриття, сліди зношування основного матеріалу та пітингові пошкодження. Встановлено, що відхилення від площинності робочих поверхонь після експлуатації зросло на порядок (порівняно з початковими 0,004…0,006 мм).

Запропонована технологія відновлення дає змогу одночасно скоригувати геометричні розміри хвостовика та регенерувати його поверхневий шар. Технологічний процес включає такі операції: доведення (притирання) робочих поверхонь; геометричний контроль; створення стискаючих напружень у

поверхневому шарі (метод ультразвукового зміцнення) з подальшим нанесенням покриття.

Для операції доведення застосовували спеціальні притири, виготовлені з чавуну перлітної структури (твердість НВ 140…200). Як робоче середовище слугували абразивні пасти на основі карбіду кремнію (SiC) у суміші з гасом. Щоб уникнути концентрації напружень, уступ, який може виникнути в місці спряження, усувають шляхом виконання піднутрення (викружки) глибиною до 0,1 мм.

Застосування описаної технології дозволяє отримати високу точність форми та необхідну шорсткість поверхонь, водночас зменшуючи розкид геометричних розмірів у межах однієї партії лопаток.

Отже, запропонований метод підвищення експлуатаційної надійності контактних поверхонь хвостовиків лопаток компресорів дає змогу подовження терміну їх експлуатації та відновлення геометрії, не погіршуючи при цьому динамічної міцності. Контрольні випробування міцності з'єднання типу «ластівчин хвіст» після відновлення засвідчили повну відповідність його вихідним (паспортним) характеристикам.

Список літератури

1 Improving the fretting performance of aero-engine tenon joint materials using surface strengthening / Lu, G., Liu, H., Lin, C. et al. / Materials Science and Technology. 2019. – Vol. 36. – No 4. – P. 409–417. DOI: 10.1080/02670836.2019.1650445.

УДК 534.1+669.2

Василів Х. Б.
канд. техн. наук, с.н.с., ФМІ НАН України ім. Г.В. Карпенка, м. Львів, Україна
Подобний О. В.
АТ «Івченко-Прогрес», м. Запоріжжя, Україна
Торба Ю. І.
канд. техн. наук., ст. досл., АТ «Івченко-Прогрес», м. Запоріжжя, Україна
Неманежин Є. О.
PhD, АТ «Івченко-Прогрес», м. Запоріжжя, Україна

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ПОВЕРХНІ НА ВТОМНУ МІЦНІСТЬ СПЛАВУ ВТ8

Для виготовлення деталей складної форми з високотвердих та важкооброблюваних матеріалів застосовують механічне фрезерування, електроерозійне різання та інші високоточні методи обробки. Застосування цих технологій впливає не лише на геометричні параметри деталей, а також на їх фізико-механічні характеристики, зокрема, на втомну міцність, яка залежить від структури поверхневого шару, залишкових напружень, дефектності і шорсткості поверхні тощо.

Досліджували втомну міцність плоских зразків зі сплаву ВТ8, отриманих різними методами обробки: фрезеруванням; одно- і багаторазовим електроерозійним різанням (ЕЕР); одноразовим ЕЕР з наступним хімічним поліруванням у розчині 700 г/л HNO_3 +160 г/л HF, за температури 35 ^oC, упродовж 40 с [1]. Втомні випробування зразків виконували при консольному згині за м'якого навантаження.

Встановлено, що фрезеровані зразки витримали базову кількість циклів коливань (10^7) без руйнування лише при мінімальному навантаженні, що становить 191 МПа. Витривалість зразків, виготовлених ЕЕР за 1 прохід несуттєво відрізняється від фрезерованих – їх границя втоми не перевищує 180 МПа, що пов'язано з підвищеною шорсткістю поверхні (Ra=2,2…2,5 мкм), присутністю концентраторів напружень, що скорочує період зародження тріщин та знижує границю втоми. Після багаторазового ЕЕР дефектність поверхні знижується (Ra=0,3 мкм), а границя втоми досягає ~300 МПа. Найвища втомна міцність виявлена у зразків після одноразової ЕЕР з наступним хімічним поліруванням – ~375 МПа. Це пов'язано зі значним зниженням дефектності поверхні після хімічного полірування (Ra=0,3 мкм). Границя втоми зросла удвічі порівняно з неполірованими зразками (рис.1).

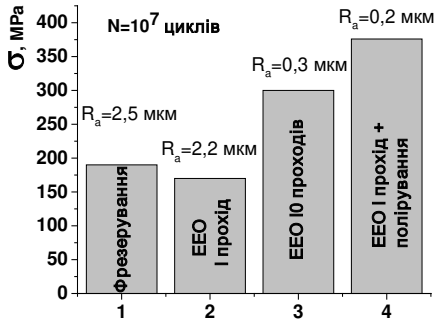


Рисунок 1 – Вплив технології обробки поверхні на границю втоми сплаву ВТ-8

Дослідження фрактограм зламів показали, що механізм втомного руйнування однаковий для всіх видів обробки зразків. Дефекти на поверхні зразків (виразки, локальні зони термічного впливу та переплавки, мікропорожнини) за дії циклічних навантажень та внутрішніх механічних напружень стають місцями зародження та розвитку тріщин. Під час випробувань відбувається мікротертя між берегами тріщини, що пришвидшує руйнування матеріалу. Найнижча втомна міцність у сплаву після одноразового ЕЕР за 1 прохід пов'язана з високою дефектністю поверхні, утворенням сітки тріщин, їх поширення і злиття під час циклічних навантажень, що викликає відколювання фрагментів металу і його пришвидшене руйнування. Операція хімічного полірування зразків, виготовлених однократним ЕЕР, усуває поверхневу дефектну зону сплаву ВТ-8 і сприяє підвищенню його границі втоми до 380 МПа, що удвічі вище, ніж у неполірованих зразків. Вибраний метод комбінованої обробки може бути технологічно та економічно доцільніший, ніж багатократна електроерозійна обробка.

Список літератури

1. Вплив хімічного та електрохімічного полірування на якість поверхні сплаву ВТ-8 після електроерозійного різання дротом / В. Р. Івашків, Х. Б. Василів, М. Р. Чучман и др. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2025. – № 4. – С. 112–118.

УДК 621.791

Морозов А. В.
інженер АТ «Мотор Січ», м. Запоріжжя, Україна

Бойко І. А.
канд. техн. наук, докторант, ДУ «Житомирська політехніка»,
м. Житомир, Україна

ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВЕ ЗВАРЮВАННЯ БАРАБАНІВ РОТОРІВ КОМПРЕСОРІВ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

Сучасні авіаційні двигуни характеризуються високими вимогами до міцності, надійності та точності виготовлення складових вузлів, зокрема роторів компресора барабанного типу, які працюють в умовах високих швидкостей обертання, температур і циклічних навантажень. Одним з основних етапів у виробництві цих вузлів є процес зварювання окремих дисків один з одним. Найсучаснішою і найскладнішою у авіаційному двигунобудуванні є конструкція ротора компресора барабанного типу, що складається з моноколіс, в яких лопатки і диск є єдиним монолітним елементом.

Висока якість зварного шва є ключовою перевагою використання електронно-променевого зварювання (ЕПЗ). Завдяки концентрації енергії електронного променю у надзвичайно малій зоні, формується вузький і глибокий шов із мінімальною зоною термічного впливу (ЗТВ). Цей механізм нагріву мінімізує структурні зміни у навколишньому матеріалі та забезпечує відсутність пор, тріщин і включень, та значно знижує внутрішні деформації і напруження, що має вирішальне значення при роботі з складнопрофільними та тонкостінними конструкціями, де збереження геометрії є пріоритетним. Крім того, електронний промінь здатний забезпечувати глибоке проплавлення металу — до кількох десятків міліметрів за один прохід.

Установка для ЕПЗ (рис. 1). складається з кількох основних функціональних блоків: електронно-променевої гармати, яка генерує, прискорює та фокусує електронний промінь, що використовується як джерело тепла; вакуумної камери, де відбувається процес зварювання; потужного джерела живлення, яке подає високу напругу для прискорення електронів; та системи керування і моніторингу, що контролює всі параметри процесу.

Зварювання у вакуумі дозволяє усунути вплив повітря та активних газів на зону зварювання, запобігаючи окисленню і забрудненню шва. Технологічна гнучкість ЕПЗ дозволяє ефективно працювати з широким спектром матеріалів, зокрема такими як титан, алюміній, жароміцні сплави та інші метали.

Оснащення для електронно-променевого зварювання (рис. 2) барабанів роторів компресорів авіаційних двигунів (1) повинно забезпечувати жорстку фіксацію деталей, збереження геометрії при термічних деформаціях, а також можливість точного позиціювання відносно вісі обертання. Конструкції таких пристосувань, як правило, включають базові оправки (9), центрувальні конуси (6), притискні кришки (3), затискні гайки (4), обертові планшайби (5) та системи охолодження. Матеріали для виготовлення оснащення вибирають з урахуванням марки матеріалу деталей, що зварюються і їх коефіцієнтів лінійного розширення, підбираючи подібні.



Рисунок 1 – Установка для ЕПЗ ЕЛА 2000/6 ТОВ «НВП «Академприлад», м. Суми, Україна

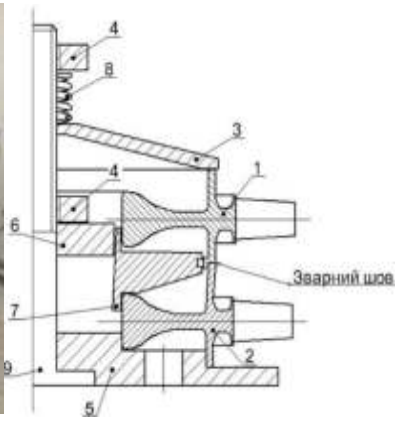


Рисунок 2 – Оснащення для ЕПЗ моноколіс ротора компресору барабанного типу

Важливим аспектом є компенсація термічної деформації під час зварювання (усадки). Для цього у конструкції застосовують регульовані опори та елементи з пружинними вставками (8), розпірними розрізними секторами (7), які розташовують в просторі між дисками компресору, якщо після зварювання конструкція та габарити вузла дають можливість їх демонтувати.

Таким чином, ЕПЗ дозволяє зварювати вузли, що входять до складу роторів компресорів авіаційних двигунів, надаючи їм необхідну високу надійність та здатність працювати в умовах надзвичайних навантажень і температур.

УДК 621.787

Герасимов В. О.
аспірант, Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

Мікосянчик О. О.
д-р техн. наук, професор, Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

Герасимова О. В.
провідний інженер,
Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ МОДИФІКОВАНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ЗІ СПЛАВІВ ТИТАНУ В АВІАБУДУВАННІ

У поточний час в загальному обсязі виробництва первинних енергоресурсів природний газ складає 50 % і вважається основним енергетичним ресурсом України.

Отримані нові рішення актуальної науково-практичної задачі забезпечення параметрів якості деталей з титанових сплавів в авіабудуванні при обробці вигладжуванням шляхом керування швидкістю обробки для оптимізованої модифікації поверхневого шару. Вплив швидкісного фактору на умови взаємодії інструмента та деталі в роботі досліджено експериментальними та чисельними методами.

Експериментально встановлено, що для отримання якісних деталей при вигладжуванні титанових сплавів необхідно керувати умовами тертя за рахунок керування швидкістю обробки при наявності змащення. Показана ефективність використання додаткового ультразвукового навантаження.

Чисельними дослідженнями показано вплив коефіцієнту тертя на величину напружень і деформацій зсуву. Встановлено, що зменшення коефіцієнту тертя до 0,05–0,10 забезпечує зменшення деформацій зсуву та підвищення залишкових напружень стиску в приповерхневому шарі деталей.

Виконане обґрунтування напрямку зменшення коефіцієнту тертя за рахунок реалізації умов гідродинамічної взаємодії сферичного індентора з поверхнею деталі. Вперше при вирішенні плоскої задачі для рівнянь Навє-Стокса враховане явище зміни в'язкості змащення під дією зовнішнього стиску. Це дозволило отримати уточнені номограми залежності тиску мастила в зазорі між індентором та поверхнею деталі та швидкістю обробки при врахуванні початкової динамічної в'язкості мастила.

Експериментально показано, що вигладжування з додатковим ультразвуковим навантаженням та при використанні змащення (мастила І-20) забезпечує високу якість поверхневого шару після обробки деталей з

титанових сплавів: шорсткість до 0.8 мкм Ra, високі залишкові напруження стиску в приповерхневому шарі глибиною 0,3–0,4 мм. При цьому забезпечують величину шорсткості поверхні до 0,8 мкм, підвищення залишкових напружень на 30–40 % та зміцнення металу поверхневого шару в 1,6–2,0 рази.

Розроблено рекомендації по вибору оптимізованих параметрів швидкості для якісного вигладжування деталей з титанових сплавів.

Список літератури

1. Теорія та практика обробки металів тиском / Під ред. Богуслаєва В. О., Бобиря М. І., Тітова В. А., Качана О. Я. – Запоріжжя, вид. АТ «Мотор Січ», 2016. – 522 с.

2. Титов А. В. Моделирование процесса алмазного выглаживания с использованием системы ANSYS / Титов А. В., Мозговой С. В., Качан А. Я. // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 4 – С. 90–96.

3. Особенности алмазного выглаживания сплава ВТ-22 с дополнительным ультразвуковым воздействием на инструмент / Титов В. А., Никитенко В. А., Титов А. В. и др. // Обработка материалов давлением. – 2009. – № 2 (20).

4. Герасимов В. О. Оцінка ефективності використання режиму гідродинамічного тертя при алмазному вигладжуванні / В. О. Герасимов, В. Б. Мельник, О. О. Мікосянчик // матеріали XV Міжнар. наук.-техн. конф. молодих вчених та студентів «Інновації молоді в машинобудуванні», м. Київ, 23 квітня 3 трав. 2024 р. / КПІ імені Ігоря Сікорського, Київ, 2024. https://imm-mmi.kpi.ua/imm2024/paper/view/30854/17680

УДК 621.74.047.44.226.2.669.245.018.28

Квасницька К. Г.
доктор філософії, Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Нога В. О., Божко В. О
аспіранти, Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ, Україна

Квасницька Ю. Г.
чл.-кор НАН України, Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ, Україна

РОЗРОБКА ЕКОЛОГІЧНОБЕЗПЕЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ КЕРАМІЧНИХ ОБОЛОНКОВИХ ФОРМ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ ВИЛИВКІВ

Визначальними факторами, що впливають на якість складнопрофільних деталей, є раціональний вибір технологічного процесу їх виплавлення та обґрунтований добір керамічних матеріалів для виготовлення форм, стрижнів і фільтрів, які забезпечують отримання виливків з високою геометричною точністю. [1].

У Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України виконано комплекс науково-дослідних робіт, спрямованих на вдосконалення технологічного процесу лиття складнопрофільних виливків, здійснено огляд і порівняння сучасних матеріалів для виготовлення керамічних оболонок, які наразі застосовуються у виробництві та можуть бути використані для подальшого вдосконалення технології лиття лопаток газотурбінних двигунів (ГТД).

Для проведення експериментальних досліджень як основний наповнювач було обрано корунд — найпоширеніший матеріал для виготовлення ливарних форм, який традиційно використовується на підприємствах-виробниках газотурбінних двигунів. У якості зв'язувального компонента на таких виробництвах зазвичай застосовують гідролізований етилсилікат. З урахуванням сучасних екологічних вимог та світових тенденцій запропоновано дослідити альтернативні зв'язувальні матеріали на водній основі – Remasol та кремнезоль (Silica sol).

Результати випробувань показали, що зразки кераміки на основі етилсилікату характеризуються невисокими показниками міцності. Керамічні оболонки, виготовлені з використанням кремнезолю, у більшості випадків демонструють вищу міцність порівняно з тими, що містять Remasol, попри те, що обидва зв'язувальні матеріали побудовані на колоїдному кремнеземі. Така відмінність пояснюється більшим вмістом кремнезему та його масовою

часткою у складі кремнезолю. Водночас кераміки з Remasol показали підвищену міцність на вигин як у сирому, так і в прожареному стані порівняно з керамiками на основі етилсилікату.

Проведено аналіз і вибір полімерних матеріалів для 3D-друку моделей керамічних оболонкових форм. Оцінено технологічні характеристики різних модельних пластиків, зокрема їхню розмірну точність, зольність, коефіцієнт лінійного термічного розширення (КЛТР), усадку та економічні показники. За результатами аналізу для виготовлення моделей конкретних виливків обрано полілактид (PLA) — один із найпоширеніших термопластиків, що є повністю біорозкладним, оскільки синтезується з полімерів молочної кислоти. Виробництво PLA базується на використанні природної сировини, такої як кукурудза або цукровий очерет. Серед основних переваг цього матеріалу для 3D-друку — низька температура плавлення (180–220 °C), густина 1240 кг/м³ та температура кипіння 227 °C. Використання полілактиду для друку моделей литих деталей також має економічні переваги, зокрема у малосерійному виробництві.

На завершальному етапі було розроблено технологічні схеми виготовлення керамічних форм із використанням водних зв'язувальних компонентів за моделями, отриманими методом 3D-друку. Запропонована технологія призначена для малосерійного виробництва складнопрофільних деталей, наприклад для ремонту газотурбінних двигунів та при розробці нових модифікацій. Використання водних сполучних матеріалів сприяє покращенню якості поверхні виливків, зменшенню кількості недоливів завдяки підвищеній газопроникності оболонок, а також підвищенню пожежної безпеки та екологічності процесу, оскільки водні зв'язувальні системи не містять органічних розчинників чи летких компонентів.

Список літератури

1. Матеріали і технології для лопаток вітчизняних промислових газотурбінних двигунів / Г. П. Мяльніца, А. М. Верховлюк, А. В. Нарівський та ін. – К. : Наукова думка. – 2023. – 180 с. ISBN: 978-966-000-1810-5.

УДК 621.757:621.7.08

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
Назар І. Б.
канд. техн. наук, доцент, НУ «Львівська політехніка»,
м. Львів, Україна

ВПЛИВ СПОСОБІВ ЗМІЦНЕННЯ НА ГРАНИЦЮ ВИТРИВАЛОСТІ ДЕТАЛЕЙ ГТД

Одним із важливих напрямів підвищення експлуатаційних характеристик деталей ГТД на етапі їх виготовлення є розроблення та впровадження прогресивних фінішних технологій, які роблять значний внесок у забезпечення якості несучих поверхонь, а отже – у підвищення ресурсу та надійності авіаційних двигунів [1].

Таблиця 1 – Вплив способів зміцнення зразків на їх границю витривалості σ_{-1} та її приріст $\Delta\sigma_{-1}$

Обробка	$\varepsilon_{ост}$, %	Незміцнені зразки σ_{-1}, МПА	Зміцнені зразки						
			σ_{-1}, МПа	σ_z, МПа	$\psi_{\sigma зал}$	$t_{кр}$, мм	$\sigma_{зал}$, МПа	$\psi_{\sigma ост}$	$\Delta\sigma_{-1}$, МПа
ОМ	0	120	140	-118	0,169	0,203	-59	0,338	20
ГДО	0	120	165	-275	0,164	0,203	-135	0,333	45
	2	120	160	-214	0,187	0,205	-111	0,362	40
	10	120	165	-255	0,176	0,198	-140	0,320	45
	15	115	160	-261	0,172	0,206	-132	0,341	45
ОР	0	120	235	-827	0,139	0,197	-325	0,354	135

У таблиці 1 наведено вплив різних способів зміцнення

(ОМ – обробка мікрошариками; ГДО – гідродробеструминна обробка; ОР – обкатування роликами) поверхневого шару деталей з концентраторами напружень на їхню границю витривалості σ_{-1} та приріст $\Delta\sigma_{-1}$ після зміцнювальної обробки.

Залежності параметрів якості поверхневого шару та границі витривалості лопаток ГТД з титанового сплаву ВТ8 від часу віброзміцнення наведено на рис. 1 [1].

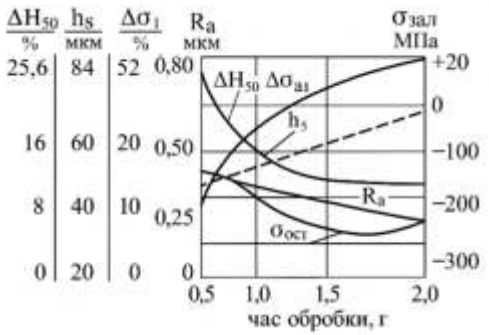


Рисунок 1 – Залежності параметрів якості поверхневого шару та границі витривалості лопаток зі сплаву ВТ8 від часу віброзміцнення:
t – час віброзміцнення, t = 0,5…2,0 год;
Ra – шорсткість аеродинамічної поверхні, мкм;
h_s – глибина зміцнення, мкм;
$\sigma_{зал.ст.}$ – залишкові напруження стику в поверхневому шарі, МПа;
$\Delta\sigma_{-1}$ – величина підвищення границі витривалості лопатки, %;
ΔH_{50} – ступінь зміцнення лопатки, %

Віброзміцнення виконували кульками діаметром 2 мм на серійній U-подібній віброустановці з використанням антикорозійної рідини ГЖ-1. Початкове значення границі витривалості лопатки становило σ_{-1} = 425 МПа.

Важливим під час виготовлення деталей, для яких необхідно забезпечити високий рівень границі витривалості, є розроблення та обґрунтований вибір фінішних методів і режимів обробки, що під час виконання фінішної операції забезпечують максимальний приріст границі витривалості.

Список літератури

1. Качан, А. Я., Петренко, А. П. Влияние режимных параметров и параметров качества поверхностного слоя на предел выносливости лопаток ГТД при их виброупрочнении. Вестник Харьковского государственного политехнического университета : сборник научных трудов. – Харьков : ХГПУ, 1999. – Вып. 42. – С. 102–104.

УДК 669.14.018.4

Lazarieva O.
Ph.D. students, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine

Prysyazhnyuk P.
Dr. of technical sciences, professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

Ropyak L.
Dr. of technical sciences, professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

Bembenek Michał
Dr. hab. inż., professor AGH, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie,Kraków, Poland

FIRST-PRINCIPLES ANALYSIS OF MECHANICAL AND ELECTRONIC PROPERTIES OF TERNARY MO AND W BORIDES IN NICKEL SUPERALLOYS

Nickel superalloys, due to their exceptional mechanical properties at high temperatures, are widely used as high-performance materials in the aerospace and power generation industries, where boron is traditionally employed to enhance grain boundary strength [1]. This paper presents a comprehensive first-principles analysis of the structural stability, electronic, and mechanical properties of ternary M_2NiB_2 (M=W,Mo) borides and their solid solutions (Mo1-xWx)2NiB2 to optimize alloying systems. The study was conducted using Density Functional Theory (DFT) and Special Quasirandom Structures (SQS) to model chemical disorder [2]. Calculations of the pseudo-binary mixing energy demonstrated that the formation of solid solutions is thermodynamically stable across the entire concentration range, with a deep energy minimum at the equiatomic composition (x=0.5), indicating its superior stability. The analysis of elastic moduli revealed a non-linear concentration dependence; specifically, Young's and shear moduli achieve local maxima at x=0.5, suggesting significant solid-solution strengthening. The calculated Vickers hardness also exhibits a pronounced maximum at x=0.5, correlating with maximum shear stiffness and indicating optimal mechanical characteristics. Topological analysis of the Electron Localization Function (ELF) and Density of States (DOS) confirms that the enhanced properties of the equiatomic composition result from strengthened covalent p-d hybridization between boron and transition metal atoms, as well as a minimization of the density of states at the Fermi level, indicating enhanced electronic stabilization. Additionally, it was found that the SQS structure at x=0.5 possesses the most complex elastic anisotropy due to the reduction of crystal lattice symmetry. The obtained results highlight the effectiveness of tungsten alloying of

M_2NiB_2 to the equiatomic composition as a strategic approach for developing strengthening phases in nickel superalloys.

Ultimately, the proposed atomic-scale engineering of grain boundary precipitates offers a promising route to extend the service life of critical components in gas turbine engines. These theoretical insights lay the groundwork for the experimental synthesis of next-generation superalloys with tailored durability [3].

The study was carried out with the funding of the National Research Foundation of Ukraine (Національний фонд досліджень України), grant No. 2023.04/0160 (0124U003748): "Development of technology for the formation of heat-resistant coatings by plasma electrolytic oxidation on aviation and rocket-space engineering components."

References

1. V. Ol'shanetskii, O. Glotka, V. Greshta, V. Khvostak (2023). Improving the properties of nickel-based superalloys of directed crystallization by optimizing the chemical composition Innovative Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering, 2, 8–12. – DOI: 10.15588/1607-6885-2022-2-1.

2. P. Prysyazhnyuk, D. Di Tommaso (2023). The thermodynamic and mechanical properties of Earth-abundant metal ternary boride $Mo_2(Fe,Mn)B_2$ solid solutions for impact- and wear-resistant alloys. Materials Advances, 4, 17, 3822–3838. – DOI: 10.1039/d3ma00313b.

3. С. Д. Харченко, С. І. Ковтун (2021). Жаростійкі покриття та перспективи їх використання для подовження ресурсу енергетичного обладнання (огляд). Теплофізика та теплоенергетика, 43, 3, 78–84. – DOI: 10.31472/ttpe.3.2021.10.

УДК 621.924 : 62-253.51

Гребенніков М. О.
аспірант, НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна
АТ «Івченко-прогрес», м. Запоріжжя, Україна

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕЖИМІВ ВІБРОАБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ТИТАНОВИХ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРА

У роботі представлено результати порівняльного дослідження ефективності трьох технологічних варіантів віброабразивної обробки титанових лопаток компресора. Метою дослідження була розробка оптимального режиму фінішування для промислового застосування після операції фрезерування. Проведено аналіз впливу різних параметрів, зокрема способу закріплення деталі, типу абразивного наповнювача та тривалості обробки, на кінцеві параметри шорсткості поверхні.

Вступ

Підвищення якості поверхні деталей авіаційного призначення є одним із пріоритетних завдань сучасного машинобудування. Особливо актуальна ця проблема при обробці критично навантажених деталей, таких як лопатки. Лопатки компресора, виготовлені методом фрезерування на обробних центрах, мають вихідну шорсткість поверхні, яка не відповідає вимогам якості готових виробів.

Метою даної роботи було дослідження ефективності трьох різних технологічних варіантів віброабразивної обробки титанових лопаток і розробка рекомендацій щодо вибору оптимального режиму для промислового застосування. Дослідження проводилося шляхом порівняльного аналізу впливу різних параметрів обробки (спосіб закріплення, абразивні матеріали, тривалість обробки) на досяжні параметри шорсткості мікропрофілю поверхонь лопаток.

Об’єкт і методологія дослідження

Для дослідження були підготовлені три партії титанових лопаток компресора (рисунок 1), виготовлених методом фрезерування на обробному центрі з ідентичними вихідними параметрами шорсткості: Ra 0,6...0,8 мкм і Rmax 5...6 мкм. Кожна партія була оброблена за одним із трьох розроблених технологічних варіантів.



Рисунок 1 – Досліджувана компресорна лопатка

Контроль якості проводився за двома параметрами шорсткості – Rmax (максимальна висота профілю) і Ra (середньоквадратичне відхилення профілю) у двох взаємоперпендикулярних напрямках пера лопатки по вигнутій («спинці» або зовнішній) і по увігнутій («кориту» або внутрішній) поверхням. Вимірювання виконані після кожного етапу обробки для аналізу ефективності попередньої та остаточної обробки.

Технологічні варіанти обробки

Варіант 1 (базовий режим). Лопатки оброблялись у вільному стані на установці для вібраційної обробки кругового типу R220. Попередня обробка виконувалася абразивним наповнювачем з якістю OFGS і розміром 9 мм протягом 3 год. Остаточна обробка проводилася протягом 6 год з використанням абразивного наповнювача якості RCP розміром до 5 мм за технологією фінішування «keramofinish». Загальний час обробки склав 9 год.

Варіант 2 (режим зі збільшеною попередньою обробкою). Застосовувалась та ж установка для вібраційної обробки у вільному стані, але час попередньої обробки було збільшено до 5 год при використанні того ж абразивного наповнювача. Остаточна обробка виконувалася ідентично варіанту 1. Загальний час обробки досяг 11 год.

Варіант 3 (режим обробки лопаток в пристосуванні). Лопатки закріплювались в спеціальному пристосуванні на установці для вібраційної обробки кругового типу FBA. Попередня обробка проводилася диференційовано: зовнішня поверхня лопаток оброблялась протягом 2 год, внутрішня – протягом 1 год. Обробка виконувалась абразивним наповнювачем якості OFGS розміром до 7 мм. Остаточна обробка виконувалась на установці типу R220 у вільному стані протягом 2 год із застосуванням абразивного наповнювача якості RCP розміром 7 мм. При даному варіанті загальний час обробки склав 5 год.

Результати дослідження

Отримано усереднені значення виміряних параметрів шорсткості поверхонь пера лопаток, а також розрахована ефективність обробки. Результати експериментів представлені в таблиці 1.

Зовнішній вигляд поверхні лопаток після етапів попередньої та остаточної обробки при збільшенні показано на рисунку 2.

Таблиця 1 – Середні значення параметрів шорсткості (мкм) та ефективність обробки (%) за варіантами

Технологічні варіанти обробки	Параметр шорсткості Ra і розрахована ефективність обробки, мкм/%				Параметр шорсткості Rmax і розрахована ефективність обробки, мкм/%			
	Зовнішня поверхня лопатки		Внутрішня поверхня лопатки		Зовнішня поверхня лопатки		Внутрішня поверхня лопатки	
	Попередня обробка	Остаточна обробка	Попередня обробка	Остаточна обробка	Попередня обробка	Остаточна обробка	Попередня обробка	Остаточна обробка
Варіант 1	0,32 / 51	0,28 / 57	0,59 / 9	0,30 / 54	2,19 / 56	1,91 / 62	3,61 / 28	2,24/ 55
Варіант 2	0,31 / 52	0,24 / 63	0,31 / 52	0,26 / 60	2,21 / 56	1,29 / 74	1,96 / 61	1,69/ 66
Варіант 3	0,19 / 71	0,15 / 77	0,23 / 65	0,14 / 78	1,22 / 76	0,85 / 83	1,21 / 76	0,85/ 83

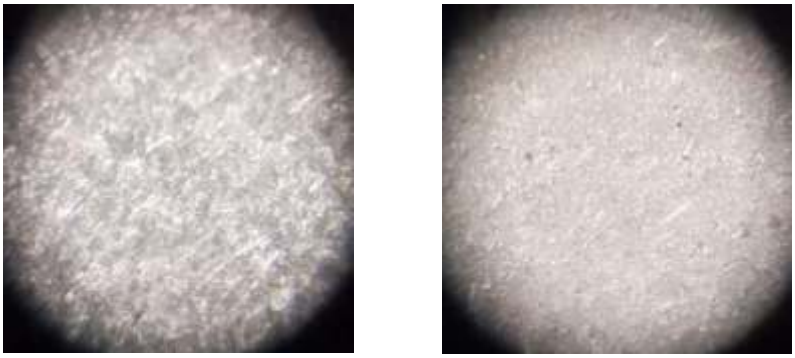
Аналіз результатів за показниками параметра Ra

По внутрішній поверхні лопатки параметр Ra продемонстрував більш високу чутливість до попередньої обробки. Якщо по зовнішній поверхні варіанти 1 і 2 показують приблизно однакові показники ефективності 51 і 52%, то по внутрішній – є велика різниця: по варіанту 1 – 9%, по варіанту 2 ті ж 52%. Застосування на остаточній обробці технології «keramofinish» забезпечило вирівнювання показників ефективності (в межах від 54 до 63%), і параметрів шорсткості (в межах від Ra 0,24 до Ra 0,30 мкм), що свідчить про продуктивність технології «keramofinish». Варіант 3 продемонстрував високу ефективність на попередньому етапі (71% по зовнішній поверхні і 65% по внутрішній), що в підсумку забезпечило досягнення найменших параметрів шорсткості Ra 0,14 і найбільшої ефективності обробки за варіантами: 77…78%.

Аналіз результатів за показниками параметра Rmax

Як і при аналізі показників Ra, відмінності в ефективності та показниках шорсткості після попередньої обробки відзначені по внутрішній поверхні (варіант 1 – 28%, варіант 2 – 61%). По зовнішній ці варіанти показали однакову ефективність – 56%. Остаточна обробка за варіантом 2 показала кращу ефективність обробки (на 11 і 12%) в порівнянні з варіантом 1. Варіант 3

продемонстрував високу ефективність на попередньому і остаточному етапах обробки – 76% і 83%.



а *б*

Рисунок 2 – Поверхня пера лопаток при збільшенні ×25:
після попередньої (*а*) та після остаточної (*б*) обробки

Комплексна оцінка варіантів

1. Варіант 1 показав найменшу, але стабільну ефективність по всіх контрольованих поверхнях пера лопаток 54…62%. Цей режим може бути застосовано тільки в якості двоступеневої обробки, оскільки параметри шорсткості, отримані після виконання попередньої обробки, вказують на наявність слідів інструменту на внутрішній поверхні корита лопатки (Ra 0,59 мкм і Rmax 3,61 мкм).

2. Варіант 2 через збільшену попередню обробку, в порівнянні з варіантом 1, продемонстрував кращу стабільність при обробленні внутрішньої поверхні. Параметри шорсткості, отримані після попереднього етапу обробки, показують достатні показники по спинці і кориту (Ra 0,31 мкм) для обробки поверхонь лопаток, до яких не пред'являють підвищених вимог якості.

3. Оцінка застосування технології «keramofinish» в якості фінішування лопаток, що обробляються без закріплення. Дана технологія, незалежно від часу обробки, дала середні параметри шорсткості між варіантами 1 і 2. При порівнянні варіантів 1 і 2 можна відзначити ефективність даної технології при обробці поверхонь з більш високими значеннями шорсткості (варіант 1). Виходячи з цього можна зробити наступну оцінку: 1) варіант 1 є кращим за варіант 2 через менший сумарний час обробки, при отриманні приблизно однакових показників шорсткості; 2) варіант 2 ефективний тільки в якості одноступеневої попередньої обробки (5 год).

4. Варіант 3 забезпечив найбільш збалансовані результати зі зниженням параметрів по всіх поверхнях пера і за часом оброблення. За даним варіантом досягнуті найбільш якісні і рівномірні значення параметрів шорсткості

лопаток по всіх точках вимірювання. Вже попередня обробка лопаток, затиснутих в пристосуванні, забезпечує досягнення 9 класу чистоти поверхні (Ra 0,2 мкм). Остаточна обробка протягом 2 годин підвищує чистоту поверхонь ще на один клас (Ra 0,1 мкм).

Висновки та рекомендації

Проведене дослідження виявило істотні відмінності в ефективності різних технологічних підходів до віброабразивної обробки титанових лопаток. Ключовий висновок полягає в тому, що ефективність обробки залежить не тільки від тривалості окремих етапів, але і від способу розміщення лопаток під час обробки.

Застосування затискного пристосування забезпечує досягнення найкращіх параметрів шорсткості після попередньої обробки, що створює сприятливі умови для ефективного фінішування. Диференційований підхід до обробки поверхонь пера дозволяє враховувати різні технологічні характеристики цих ділянок.

На підставі отриманих результатів для виробництва титанових лопаток, виготовлених методом фрезерування, рекомендується впровадження варіанту 3 як основного технологічного режиму. Цей режим забезпечує:

- найбільш рівномірну якість поверхні по всіх напрямках пера лопаток;
- досягнення параметрів шорсткості мікропрофілю поверхонь пера лопаток Ra 0,14 мкм і Rmax 0,85 мкм;
- мінімальний час обробки – 5 год (проти 9 год для варіанту 1 і 11 год для варіанту 2);
- оптимальне співвідношення продуктивності та якості;
- кращу техніко-господарську доцільність для масового виробництва.

Варіант 2 рекомендується розглядати як альтернативний режим (збільшена за часом попередня обробка, без виконання остаточної) для спеціальних випадків, коли до лопаток, що виготовляються, не пред'являються підвищені вимоги якості (наприклад, виконання обробки тільки для видалення слідів фрезерування). Варіант 1 виключається внаслідок отримання неприйнятних результатів при невиправдано високих виробничих витратах.

Для забезпечення стабільності технологічного процесу рекомендується впровадити систему контролю якості, що передбачає вимірювання параметрів Rmax і Ra в обох взаємоперпендикулярних напрямках мікропрофілю поверхонь пера з кратністю не менше однієї лопатки з комплекту. Допустимі значення показників шорсткості повинні бути встановлені на рівні: Ra – не більше 0,2 мкм, Rmax – не більше 1,0 мкм.

Отримані результати відкривають перспективи для подальшого вдосконалення технології фінішної обробки лопаток з титанових сплавів шляхом уточнення вихідних параметрів шорсткості поверхонь після фрезерування, якості абразивних матеріалів, які використовуються, та тривалості обробки.

УДК 621.794.61

Бандура А. І.
д-р фіз.-мат. наук, професор, 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

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

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ПОКРИТТІ, СФОРМОВАНОМУ НА АЛЮМІНІЇ ПЛАЗМОВИМ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИМ ОКСИДУВАННЯМ

Розробка перспективних способів зміцнення для підвищення якості, надійності та довговічності деталей машин та елементів конструкції є важливою науковою та практичною задачею [1, 2]. Під час виготовлення деталей можна заздалегідь створювати бажаний фізико-механічний стан поверхневих шарів металу, від якого значною мірою залежатиме роботоздатність під час циклічного навантаження та зносостійкість деталей машин. До важливих показників такого стану відносяться залишкові напруження [3]. Задача дослідження залишкових напружень потребує подальшого вивчення, спрямованого на створення надійних, простих і точних методів їхнього визначення, розкриття механізму їхнього виникнення, з'ясування закономірності їхнього впливу на роботоздатність виробів, що експлуатуються в різних умовах.

З цією метою авторами побудована математична модель залишкових напружень у покритті, сформованому на алюмінії плазмовим електролітичним оксидуванням, а також розроблено пристрій, що дозволяє підвищити точність експериментального визначення величини залишкових напружень за рахунок виключення похибки, зумовленої спотворенням напруженого стану зразка, викликаного розчиненням матеріалу в порах, за рахунок здійснення попереднього просочення пористого матеріалу наповнювачем, хімічно інертним до пористого матеріалу або матеріалу покриття, металевій підкладці та електроліті. Як наповнювач використовують парафін, фенольну смолу або фторопласт. Додатково використовується реєстрація стрибка потенціалу електрода, що вказує на відкриття пор, і здійсненні катодного захисту в періоди релаксації напружень після зняття чергового поверхневого шару з

частини поверхні зразка вздовж його поздовжньої осі шляхом хімічного розчинення в середовищі електроліту. Виходи цифрового перетворювача, лічильника часу, вимірювача потенціалу електрода і вимірювача деформації з'єднані з входом ПК, який здійснює обробку результатів вимірювань за відомими формулами і видає на друк епюру залишкових напружень за товщиною зміцненого шару матеріалу зразка чи покриття.

Визначення залишкових мікронапружень в поверхневих шарах оксидованих стержнів проводили за методом вимірювання деформацій, що виникають під час зняття шарів з половини цих стержнів. Вимірювання деформацій здійснювалося за допомогою тензородатчиків опору. Припускали, що залишкові напруги постійні за довжиною стержня, а крайовий ефект на основі принципу Сен-Венана поширюється на довжину l_k. Зняття шарів оксиду проводили хімічним травленням. Для вимірювання осьової деформації використовували спеціальну установку. Тарування тензодатчиків опору проводили під час прогину стержня.

Встановлено, що в оксидних покриттях, сформованих плазмовим електролітичним оксидуванням, на алюмінієвих деталях виникають залишкові напруження стиску, що спричинено більшим об'ємом утвореного оксиду ніж об'єм алюмінію використаний на його утворення.

Дослідження виконано завдяки фінансуванню Національним фондом досліджень України (National Research Foundation of Ukraine), грант № 2023.04/0160, (0124U003748): «Розробка технології формування жаростійких покриттів методом плазмового електролітичного оксидування на деталях авіаційної та ракетно-космічної техніки».

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. – 10(7). – 628 p. https://doi.org/10.3390/coatings10070628

2. 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. – 6(1). – P. 146–167. https://doi.org/10.3390/ceramics6010010

3. Evaluation of residual stress levels in plasma electrolytic oxidation coatings using a curvature method / Dean, J., Gu, T., Clyne, T.W. // Surf. Coat. Technol. – 2015. – 269. – P. 47–53. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.11.006

УДК 621.438.4

Омельченко Ю. В.
аспірант кафедри ТАД НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

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

ВПЛИВ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗМІЦНЕННЯ ЛОПАТОК ГТД

Підвищення ресурсу та надійності лопаток компресорів газотурбінних двигунів (ГТД) залишається одним із ключових завдань авіаційного матеріалознавства. Ультразвукове зміцнення широко застосовується для створення залишкових напружень стиску у поверхневому шарі, що підвищує втомну міцність і стійкість до корозійного розтріскування [2, 3]. Проте ефективність зміцнення значною мірою залежить від подальших операцій фінішної обробки, які можуть як підсилити, так і частково нівелювати ефект зміцнення [1, 4].

Для забезпечення необхідної шорсткості поверхні після зміцнення застосовують різні види фінішної обробки – віброфінішування, полірування, мікрошліфування, абразивно-струменеву та електрохімічну обробку [1, 4].

Вибір методу фінішної обробки після ультразвукового зміцнення є критичним. Надмірна інтенсивність механічного або абразивного впливу може призвести до часткового або повного зняття ефекту зміцнення [1,4]. Найбільш ефективним виявляється поєднання ультразвукового зміцнення з м'якою віброфінішною обробкою скляними мікрошариками, що забезпечує підвищення втомної довговічності на 25–35 % при збереженні точності профілю [1, 4].

Ультразвукове поверхневе зміцнення створює тонкий зміцнений шар з залишковими напруженнями стиску та дрібнозернистою структурою, що підвищує втомну міцність і тріщиностійкість лопаток компресора [2, 3]. Водночас нерівномірна пластична деформація може погіршувати якість поверхні та її аеродинаміку. М'які фінішні методи, зокрема віброфінішування скляними мікрошариками, ефективно зменшують шорсткість, не порушуючи зміцненого шару й зберігаючи стиснуті напруження [1, 4]. Проте некоректний вибір режимів фінішної обробки може частково нівелювати ефект USP.

Таблиця 1 – Переваги та недоліки різних методів обробки

Метод	Переваги	Недоліки
Віброфінішування скляними мікрошариками [1, 4]	Збереження залишкових напружень, покращення чистоти поверхні	Можливе часткове зняття зміцненого шару при надмірній тривалості
Абразивне полірування [4]	Висока чистота поверхні, точне коригування профілю	Ризик видалення зміцненого шару
Мікрошліфування [4]	Контрольована зйомка матеріалу, придатність для локальних зон	Висока трудомісткість
Електрохімічна обробка	Відсутність механічного впливу	Може зменшити рівень стискаючих напружень

Список літератури

1. Application of Vibropeening on Aero Engine Components / Feldmann G. G., Haubold T., Wong C. C., Wei W. // Procedia CIRP. – 2014. – Vol. 23. – P. 180–185.

2. Influence of Ultrasonic Surface Rolling Process and Shot Peening on Fretting Fatigue Properties of Ti 6Al 4V / Liu C., Wang N., Li H., Zhang Y. // Materials. – 2017. – Vol. 10, No. 7. – 833 p.

3. Качан А. Я. Закономерности формирования остаточных напряжений в перьях лопаток технологическими методами с учётом технологической наследственности / Качан А. Я., Уланов С. А. // Вестник двигателестроения. – 2019. – №1. – С. 61–79.

4. Качан А. Я. Отделочно-упрочняющие технологии обработки лопаток моноколёс современных газотурбинных двигателей / Качан А. Я. // Вестник двигателестроения. – 2010. – № 1. – С. 81–91.

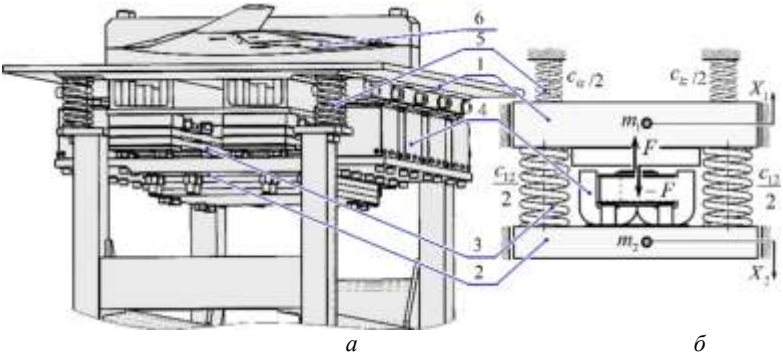
УДК 629.7

Колодій І. В.
аспірант, НУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

Савуляк М. В.
студент, НУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

МОДЕРНІЗАЦІЯ ВІБРАЦІЙНОГО СТЕНДА ДЛЯ ВИПРОБОВУВАННЯ ВИРОБІВ АВІАЦІЙНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

На практиці часто виникає потреба у модернізації існуючого обладнання, шляхом підвищення його ефективності функціонування. Взявши за основу матеріали [1], автори пропонують підхід, що забезпечує трансформацію класичної двомасової резонансної коливальної системи вібраційного стенда в тримасову міжрезонансну коливальну систему. Базовий двомасовий резонансний вібраційний стенд з електромагнітним приводом зображено на рис. 1.



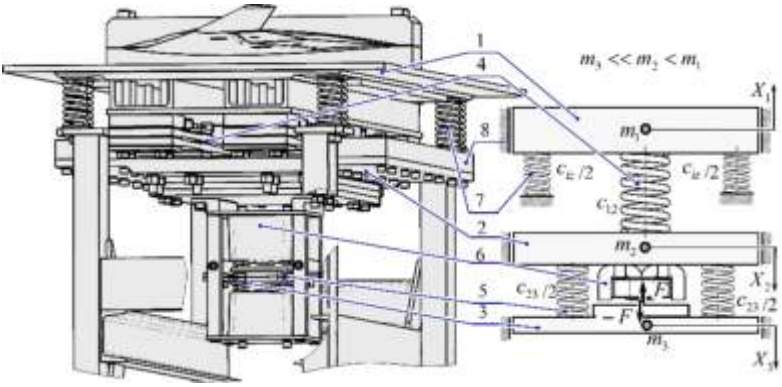
а *б*

Рисунок 1 – Двомасовий резонансний вібраційний стенд:
а – просторова модель; *б* – принципова схема коливальної системи

Стенд містить робочий орган 1 масою m_1, на який встановлено елемент крила 6, що потребує випробовування на вібростійкість. Робочий орган 1 з'єднаний через резонансний пружний вузол 3 жорсткістю c_{12} з реактивним органом 2 масою m_2. Конструкція встановлена на нерухому основу через віброізолятори 5 жорсткістю c_{iz}, що кріпляться до робочого органа 1. Силове збурення коливань на коловій частоті вимушених коливань відбувається за рахунок електромагнітних віброзбуджувачів 4, якорі яких закріплені до робочого органа 1, а осердя з котушками до реактивного органа 2. Робочий та реактивний органи під дією знакозмінної сили збурення F коливаються в усталених режимах відповідно з амплітудами коливань X_1 та X_2.

Модернізація вібраційного стенда на рис. 1 зводиться до наступного. В систему вводиться третій коливальний орган 3 масою m_3 (рис. 2), який через другий резонансний пружний вузол 5, коефіцієнт жорсткості якого c_{23}, з'єднаний з коливальним органом 2 масою m_2. Коливальний орган 3 в даній конструкції є реактивним, а коливальний орган 2 є проміжним. Силове збурення коливань відбувається за рахунок електромагнітних віброзбуджувачів 6, якорі яких закріплені до реактивного органа 3, а осердя з котушками до проміжного органа 2. Робочий, проміжний та реактивний органи коливаються в усталених режимах відповідно з амплітудами коливань X_1, X_2 та X_3.

Ввівши в механічну систему третю коливальну масу m_3, реалізовано міжрезонансний режим роботи вібраційного стенда. Завдяки цьому для приведення в рух робочого органа необхідно буде затрачати значно меншу силу збурення від електромагнітних віброзбуджувачів порівняно з базовою моделлю.



а) б)

Рисунок 2 – Тримасовий резонансний вібраційний стенд:
а – просторова модель; *б* – принципова схема коливальної системи

Список літератури

1. Ланець О. Основи розрахунку та конструювання вібраційних машин. Книга 1. Теорія та практика створення вібраційних машин з гармонійним рухом робочого органа: навч. посібник / О. Ланець. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2018. – 612 с.

УДК 629.7

Свищ Т. В.
аспірант, НУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

Кльофа Р. А.
студент, НУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

УДОСКОНАЛЕННЯ ЕКСЦЕНТРИКОВО-МАЯТНИКОВОГО ВІБРАЦІЙНОГО СТЕНДА ДЛЯ ВИПРОБОВУВАННЯ ВИРОБІВ АВІАЦІЙНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Для вібраційного випробовування виробів авіаційної промисловості широко застосовуються спеціалізовані стенди. Об'єктом дослідження даних матеріалів є вібраційний стенд, що працює на чітко встановленій частоті вимушених коливань. В його конструкції передбачається використання лише одного електродвигуна та відсутність механізмів примусового напрямлення коливань.

У якості прототипу було взято конструкцію нерезонансного вібраційного стенда [1] (рис. 1) ексцентриково-маятникового типу.

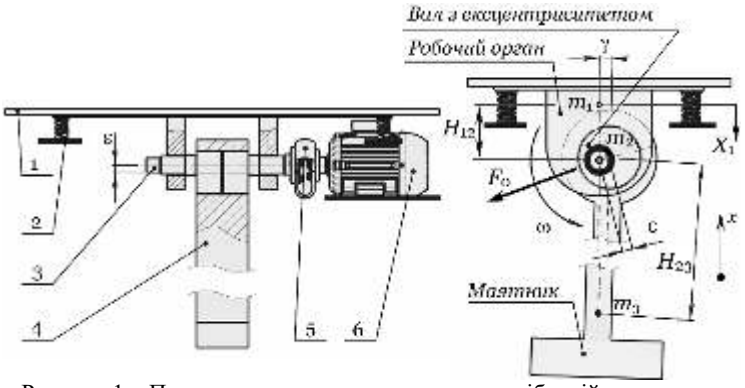


Рисунок 1 – Принципова схема нерезонансного вібраційного стенда

Робочий орган 1 масою m_1 встановлюють на нерухому основу через віброізолятори 2. В корпусі робочого органа 1 встановлено приводний вал 3 масою m_2, на який з ексцентриситетом ε посаджено маятник 4 масою m_3. Вал 3 через пелюсткову муфту 5 приводиться в рух від асинхронного електродвигуна 6. За рахунок обертального руху вала з коловою частотою ω виникає вектор сили збурення F_o, що і приводить коливальний рух систему за гармонійним законом. Маса m_1 коливатиметься в протифазі до маятника масою m_3 з амплітудою коливань X_1. Завдяки тому, що центр мас маятника опущений відносно осі обертання вала на величину H_{23}, передавання зусилля

на робочий орган у вертикальному напрямку відбуватиметься практично повністю, у горизонтальному напрямку – частково. Кут відхилення γ маятника малий.

Недоліком даної конструкції є те, що вона нерезонансна. На рис. 2 подано принципову схему запропонованого вібраційного стенда. Відрізняється він тим, що робочий орган 1 через резонансні пружні елементи 2 з'єднано з реактивним органом 3, який встановлено на фундамент через віброізолятори 4. Далі конструкція має схожість з прототипом. Так, в корпусі реактивного органа 3 встановлено приводний вал 5, на який з ексцентриситетом ε посаджено маятник 6. Вал 5 через гнучку муфту 7 приводиться в рух від асинхронного електродвигуна 8. Маятник 6 і реактивний орган 3 періодично зміщуються один відносно одного на величину ε завдяки обертанню вала 5. Робочий (активний) орган 1 збурюється від руху реактивного органа 3. До робочого органа жорстко консольно закріплено крило планера 9.

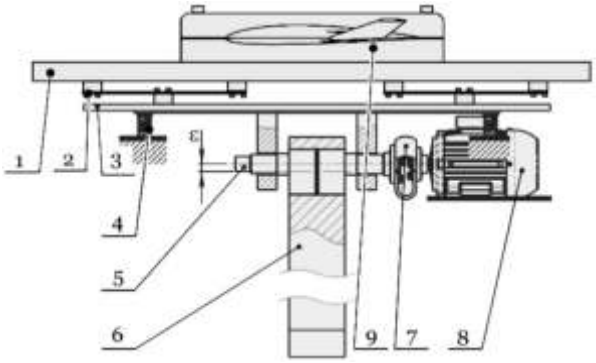


Рисунок 2 – Принципова схема резонансного вібраційного стенда

Саме для дослідження на вібростійкість крила планера і розробляється даний стенд.

Список літератури

1. Lanets O., Dmytriv V., Borovets V., Derevenko I., Horodetskyy I. Analytical model of the two-mass above resonance system of the eccentric-pendulum type vibration table // International Journal of Applied Mechanics and Engineering. – 2020. – Vol. 25, № 4. – P. 116–129.

УДК 629.7

Капало Р. В.
аспірант, НУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

Веснін С. В.
студент, НУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

РОЗРОБЛЕННЯ ВІБРАЦІЙНОГО СТЕНДА З ГІДРОМУФТОЮ ДЛЯ ВИПРОБОВУВАННЯ ВИРОБІВ АВІАЦІЙНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

У промисловості широкого розповсюдження здобули вібраційні стенди, режим роботи яких дорезонансний відносно власної частоти коливань системи. Даний режим дозволяє суттєво знизити споживану потужність привода. В таких вібраційних стендах для стабілізації частоти обертання дебаланса в околі резонансного піка використовують системи керування, що значно здорожчують конструкції та їх обслуговування.

Взявши за основу матеріали [1], пропонується розроблення вібраційного стенда з інерційним приводом здійснювати з використанням гідромуфти. Ведучий вал гідромуфти приводитиметься в рух від електродвигуна. Ведений вал гідромуфти буде з'єднаний з дебалансом. У такому випадку передбачається, що ротор асинхронного електродвигуна виходитиме на номінальні режими роботи, а оберти дебаланса "зависатимуть" в околі резонансного піка завдяки процесам, пов'язаним з явищем Зоммерфельда. Це дозволить автоматично "фіксувати" частоту вимушених коливань з близьким дорезонансним налагодженням, реалізуючи в коливальній системі вібраційного стенда енергоощадні режими роботи. Дорогих систем керування при цьому буде не потрібно.

Запропонований вібраційний стенд (рис. 1) містить реактивний орган 5 масою m_2, знизу до якого закріплено дебалансний вузол 4 масою m_d. Робочий орган 7 масою m_1 з'єднаний з реактивним органом 5 через плоскі резонансні пружини 6. Конструкція встановлена на нерухому основу через віброізолятори 8. Віброізолятори кріпляться до робочого органа 7.

Коливальна система приводиться в рух наступним чином. Ротор асинхронного електродвигуна 1 після його включення починає обертатись. Його рух описуємо моментом збурення M та кутом повороту θ. Асинхронний двигун приводить в рух ведучий вал гідромуфти 2. Оберти від веденого валу гідромуфти, що описуються кутом повороту φ, через гнучку муфту 3 передаються на дебаланс 4. Знакозмінне силове збурення вимушених коливань в системі відбувається за рахунок примусового обертання з коловою частотою ω дебаланса масою m_d, центр мас якого розташовано з ексцентриситетом r відносно осі обертання вала. Відцентрова сила F_i, що виникає, і є причиною знакозмінного силового збурення коливальної маси вздовж осі x. Коливальний рух від маси m_2 через плоскі резонансні пружини 6 передається на масу m_1.

Маси m_1 та m_2 коливатимуться в протифазі з амплітудами відповідно X_1 та X_2. Передбачається, що коливання мас вздовж осі y будуть малими, а тому цими рухами нехтуємо.

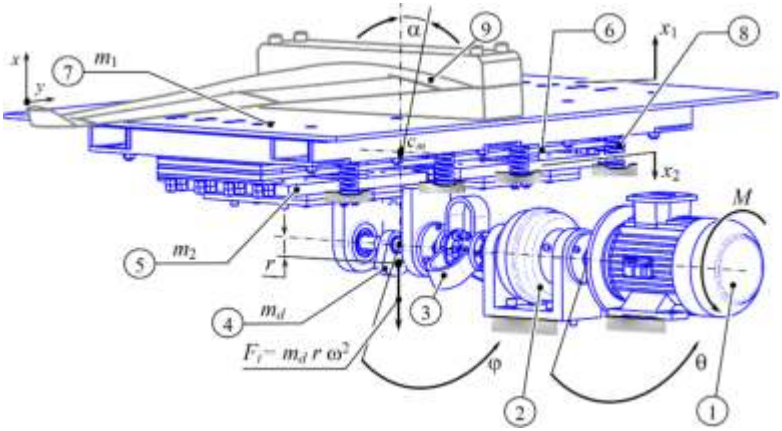


Рисунок 1 – Принципова схема резонансного вібраційного стенда з гідромуфтою: 1 – асинхронний електродвигун; 2 – гідромуфта; 3 – гнучка пелюсткова муфта; 4 – дебаланс; 5 – реактивна маса (реактивний орган); 6 – резонансна пружна система; 7 – активна маса (робочий орган); 8 – віброізорятори; 9 – консольно закріплене крило планера

У зв'язку з тим, що вал дебаланса розташований на певній відстані від центру мас системи c_m – виникає момент збурення, що провертає коливальну систему в площині xy за незалежною координатою γ.

Список літератури

1. Ланець О. Основи розрахунку та конструювання вібраційних машин. Книга 1. Теорія та практика створення вібраційних машин з гармонійним рухом робочого органа: навч. посібник / О. Ланець. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. – 612 с.

УДК 62-213.9

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

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ З ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ 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. 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 блискавкозахищеності відповідно до АП-29, тобто здатності витримувати високі напруги грозового розряду, при цьому не руйнуючись та захищаючи обладнання. Планується представити кілька технологій зразків композитів з полімерною сполучною, а саме: з наповнювачем у вигляді вуглецевих нанотрубок; з внутрішніми шарами з алюмінієвої або мідної фольги; з внутрішніми шарами з дротяної сітки з міді або алюмінію; з напиленим покриттям; 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 300±10 кВ протягом 5-10 сек імітуватиме потрапляння літального апарату до грозового розряду. Випробування навантаженням зразка напругою бортової мережі 27В і постійним струмом 300А та 115В змінним струмом 300А імітуватиме штатну роботу протягом 30 хвилин. Методика експерименту для всіх дослідів однакова та наведена нижче. Провести замір електричного опору досліджуваного зразка вимірювальним приладом. Записати результати в таблицю. Ввімкнути джерело живлення, виставити необхідну напругу. Перевірити чистоту та якість поверхні контактів зразка, при необхідності провести зачистку контактних поверхонь до металевого блиску. Підключення зразка проводити не пізніше ніж три години після підготовки контактних поверхонь для запобігання появи окисної плівки та збільшення перехідного опору у місці контакту. Підключити зразок до зажимів джерела живлення,

ввімкнути живлення, та подати напругу на досліджуваний зразок та почати відлік часу експерименту. У разі початку руйнування або пошкодження зразка раніше під час експерименту, перервати подачу напруги, занотувати час початку руйнування. Дати зразку охолонути до кімнатної температури та провести замір електричного опору, результати записати до Таблиці 1 із зазначення у примітках часу початку руйнування зразка. В разі успішного перебігу експерименту, після закінчення часу експерименту, зняти напругу із досліджуваного зразка, дати йому охолонути до кімнатної температури. Вимкнути джерело живлення. Провести зовнішній огляд та оцінку цілісності (або ступінь руйнації) зразка, занотувати або сфотографувати його стан. Провести вимірювання електричного опору зразка, результати занести до таблиці експерименту. Почати підготовку до наступного випробування.

Таблиця 1 – Результати експерименту

Тип зразка/ Опір, Ом	Вид навантаження зразка			Примітка
	+27В / 300А	~115В / 100А	Грозовий розряд 300кВ	
Нанотрубки				
Фольга				
Сітка				
Напилене покриття				
Стільникові пластини				

Результати, отримані після випробувань надалі визначать переваги та недоліки конструкторсько-технологічних способів покращення якості композитних кабін загалом та сформує оптимальний підхід до їх виготовлення.

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

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ГРАФІТИЗОВАНИХ ЧАВУНІВ ДЛЯ ГАЛЬМІВНИХ СИСТЕМ ТРАНСПОРТНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Актуальність використання чавунів у сучасній промисловості та техніці залишається високою завдяки унікальному поєднанню його властивостей, які постійно вдосконалюються. Основні аспекти актуальності містяться у універсальність застосування – чавун використовується у дуже широкому діапазоні виробів: від деталей машин, інженерних конструкцій та промислового обладнання до побутових предметів. Відмінні експлуатаційні властивості – чавун має високу міцність (особливо чавун з кулястим графітом – міцність на при розтязі), зносостійкість, жаростійкість та корозійну стійкість [1]. Ці якості роблять його незамінним для виготовлення деталей, що працюють в умовах інтенсивного тертя або високих температур, наприклад, гальмівних колодок, блоків циліндрів двигунів. Треба згадати й теплові його характеристики – важливою властивістю є здатність довго зберігати та рівномірно розподіляти тепло, що особливо цінується у виробництві печей, радіаторів опалення, тощо. Крім того чавун є відносно дешевим матеріалом, а його ливарні властивості дозволяють виробляти складні деталі з мінімальною подальшою механічною обробкою. Чавуни легко піддаються покращенню властивостей шляхом легування різними добавками (наприклад, міддю, хромом, нікелем) або термічної обробки можна досягти специфічних, покращених властивостей, таких як підвищена міцність, корозійна стійкість, що розширює спектр його застосування. Крім того вже наявні сучасні дослідження, які включають розробку композиційних матеріалів на основі чавуну, що поєднують традиційну міцність зі зниженою масою та поліпшеними характеристиками. Це відкриває нові перспективи для його використання.

Отже, завдяки поєднанню сприятливих властивостей та постійному їх вдосконаленню, чавун залишається важливим та актуальним матеріалом у багатьох галузях сучасної індустрії.

Окремо треба зауважити, що чавун є основним і найбільш поширеним матеріалом як для гальмівних дисків, так і для деяких типів гальмівних колодок (особливо на залізничному транспорті) [2]. Його використання обумовлене низкою унікальних властивостей, які ідеально підходять для

потреб гальмівних систем. Переваги використання чавуну для гальмівних елементів складаються з високих антифрикційних властивостей. Так, наявність графіту у структурі чавуну (особливо сірого чавуну) діє як природне мастило, що забезпечує стабільний та високий коефіцієнт тертя при різних швидкостях і навантаженнях. Також, відмінна теплопровідність та термостійкість [3], це дозволяє ефективно розсіювати велику кількість тепла, яке утворюється під час тертя та гальмування, що запобігає перегріванню, деформації та пошкодженню гальмівних дисків. Немаловажним є і зносостійкість чавунних деталей, тому як даний матеріал стійкий до зношування і не схильний до «залипання», а саме це забезпечує довговічність як колодок, так і дисків. Гальмівні елементи з чавуну зберігають свої властивості (коефіцієнт тертя, міцність) навіть при високих температурах, що забезпечує надійність гальмування в різних умовах експлуатації. При цьому чавун є відносно недорогим матеріалом, а процес лиття дозволяє серійно виробляти деталі складної форми (наприклад, вентильовані диски) з мінімальною подальшою обробкою, що робить його економічно вигідним вибором. Незважаючи на численні переваги, чавун має певні недоліки. Так чавун є щільним і важким матеріало, що збільшує масу транспортного засобу і може незначно впливати на керованість та паливну ефективність. Присутня у чавунів й схильність до корозії при впливі атмосферних умов і, якщо його не захистити, це може призвести до проблем зчеплення колодок з диском після, наприклад, тривалої стоянки. Таким чином, використання чавуну для гальмівних колодок (на залізниці) та дисків (в автомобілях) залишається домінуючим завдяки оптимальному співвідношенню його експлуатаційних характеристик (термостійкість, зносостійкість, стабільність тертя) та економічної доцільності.

Список літератури

1. Jim Jack Services Ltd. URL: https://www.jimjackservices.co.uk /what-is-the-difference-between-cast-iron-and-carbon-ceramic-disc-brakes. (дата звернення: 30.10.2025).

2. OEM/ODM BRAKE SYSTEM SUPPLIER. URL: https://sensitivebrake.com/what-are-the-common-materials-used-in-brake-rotors/#:~:text=1.,a%20higher%20percentage%20of%20carbon. (дата звернення: 30.10.2025).

3. A. Jakubus, M.S. Soiński. Thermal Shock Resistance of Cast Iron with Various Shapes of Graphite Precipitates. ARCHIVES of FOUNDRY ENGINEERING. 2018. Vol. 18, Issue 2/2018. P. 121-124. DOI: /10.24425/122513 (date of access: 30.10.2025).

УДК 669.715:669.018.25:620.186

Пучек С. В.
аспірант, НУ «Запорізька Політехніка»,м. Запоріжжя, Україна
Бєліков С. Б.
д-р техн. наук, професор, НУ «Запорізька Політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

ВИВЧЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ЖАРОМІЦНОГО СПЛАВУ ЖС26-ВІ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВІДПОВІДАЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ ГТД

Створення газотурбинних двигунів (ГТД) нових поколінь вимагає підвищення їх експлуатаційних характеристик, таких як потужність, ресурс, надійність та долговічність роботи у поєднанні з економічністю. Для сучасних ГТД найкращим матеріалом як для неохолоджуваних, так і для охолоджуваних повітрям лопаток є високоміцні ливарні нікелеві сплави, у складі яких можуть бути хром, кобальт, титан, алюміній, вольфрам та інші елементи. Прикладом такого сплаву може бути нікелевий сплав ЖС26-ВІ [1].

Для дослідження використовували зразки зі сплаву ЖС26-ВІ, отримані в ході серії експериментальних плавок. Оцінку макро- та мікроструктури проводили на різних етапах: у литому стані, після стандартної термічної обробки та після гарячого ізостатичного пресування (ГІП). Механічні та жароміцні властивості визначали за стандартними методиками для оцінки відповідності вимогам нормативної документації.

Серія експериментальних плавок зразків сплаву ЖС26-ВІ виявила значне подрібнення макрозерна внаслідок інтенсивного тепловідведення та високих швидкостей кристалізації. Макроструктура всіх досліджених зразків є задовільною та відповідає технічним умовам. Мікроструктура зразків до термообробки відповідає литому стану сплаву, а після термічної обробки за стандартними режимами також відповідає технічним умовам та затвердженій шкалі мікроструктур.

Можна зробити висновок, що структура досліджених зразків після штатної термообробки була досягнута завдяки відповідності хімічного складу сплаву. Термічна обробка та гаряче ізостатичне пресування (ГІП) повністю усунули внутрішню мікропористість. У структурі всіх досліджених сплавів спостерігалося виділення карбідів та карбонітридів у вигляді дрібних частинок сферичної та пластинчастої морфології, загалом рівномірно розподілених по всьому матеріалу.

Механічні та жароміцні властивості зразків відповідають вимогам нормативної документації до відповідальних жароміцних виливків. Для підтвердження достатності продемонстрованого рівня механічних властивостей рекомендується провести технічні випробування (моторні, натурні) деталей у складі газотурбінного двигуна (ГТД) за прийнятою методикою авіаційних правил.

Список літератури

1. Структура та властивості литих лопаток авіаційних двигунів з жароміцного нікелевого сплава ЖС26-ВІ після горячого ізостатичного пресування / П.Д. Жеманюк, В.В. Клочіхін, Н.О. Лисенко, В.В. Наумик // Вісті двигунобудування. – 2015. – №1. – С. 139–136.

УДК 629.7.07, 621.791.9, 539.3

Дзюбик А. Р.
канд. наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка»,
м. Львів, Україна

Назар І. Б.
канд. наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка»,
м. Львів, Україна

Войтович А. А.
канд. наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка»,
м. Львів, Україна

Лампіцький О. С.
аспірант, Національний університет «Львівська політехніка»,
м. Львів, Україна

ОСБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АУСТЕНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ У ЗВАРЮВАЛЬНИХ З'ЄДНАННЯХ АВІАЦІЙНІЙ ДЕТАЛЕЙ

Сучасна концепція проектування та виготовлення авіаційних конструкцій базується на принципах крупновузлового складання, що забезпечує підвищену технологічну гнучкість, скорочення виробничого циклу, а також спрощення процедур технічного обслуговування і ремонту. При цьому застосування високоміцних сталей дає змогу зменшити матеріаломістку складову деталей.

Досвід показує, що застосування аустенітних матеріалів для зварювання високоміцних матеріалів дає змогу забезпечити пластичність наплавленого металу, релаксацію залишкових напружень та створення дифузійностійкого проміжного шару. Крім того, аустенітні зварювальні матеріали створюють умови для зменшення енергетичних витрат технологічного процесу шляхом зниження або навіть усунення необхідності попереднього підігріву. Особливо важливо це при зварюванні елементів із високоміцних сталей, які чутливі до термічних циклів технологічних процесів.

Разом із тим, часто при зварюванні високоміцних конструкційних сталей слід враховувати структурно-фазову несумісність аустенітного металу шва з основним матеріалом. Утворення перехідних зон із підвищеною твердістю на межі сплавлення може призводити до локальної крихкості та зародження мікротріщин при циклічних навантаженнях, характерних для авіаційних деталей. Такі явища обумовлені різницею у коефіцієнтах термічного розширення та фазових перетвореннях під час охолодження після зварювання. У високоміцних сталях із високим вмістом вуглецю або спеціальною термомеханічною обробкою часто формуються структури гартування у зоні

термічного впливу [1, 2], що створює додаткові структурні напруження. Як наслідок, у металі виникає градієнтне поле залишкових напружень [3], у якому можлива навіть зміна знаку напружень. Усе це призводить до локального зменшення тріщиностійкості та зниження довговічності деталей, що працюють в умовах змінних навантажень [4].

Зважаючи на вище означене, для забезпечення надійності означених зварних стиків необхідно впроваджувати комплексні методи прогнозування та контролю залишкових зварювальних напружень. Ефективним є поєднання експериментальних методів із чисельним моделюванням термомеханічних процесів у зварному з'єднанні [3, 4]. Це дає змогу враховувати не лише термічний цикл зварювання, але й фазові перетворення матеріалу в зоні сплавлення. Встановлення розподілу залишкових напружень у зварних з'єднаннях із аустенітними швами дає змогу прогнозувати тріщиностійкість, втомну міцність і стабільність геометрії вузлів авіаційних конструкцій. В результаті досягається підвищення довговічності та надійності при мінімізації витрат на технічне обслуговування.

Список літератури

1. Carrouge, D. Phase transformations in welded supermartensitic stainless steels. – Apollo - University of Cambridge Repository. – Cambridge. – 2002. – Mode of access: https://doi.org/10.17863/CAM.14251

2. Franceschi M. Effect of the welding technique and post-welding heat treatments on the microstructure and mechanical properties of a high silicon nanostructured carbide-free bainitic steel / M. Franceschi, E. Bregolin, A. Miotti-Bettanini, et al. // Journal of Materials Research and Technology. – 2024. – Vol. 31. – P. 718 – 732. - Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.06.075

3. Dzyubyk A. Effect of welding axial stresses on the strength of a welded pipe joint with a defect / A. Dzyubyk, L. Dzyubyk, O. Soloviov // Vibroengineering Procedia. – 2024. – Vol. 55. – P. 187–193. – Mode of access: https://doi.org/10.21595/vp.2024.24371

4. Teng T. Effect of residual stresses on fatigue crack initiation life for butt-welded joints / Tso Teng, Peng-Hsiang Chang // Journal of Materials Processing Technology. 2004. – Vol. 145. – P. 325–335. – Mode of access: 10.1016/j.jmatprotec.2003.07.012

УДК 621.002.3:669.295

Лівертовський М. І.
PhD студент, НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна
Котов О. Б.
д-р техн. наук, професор, НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна
Павленко Д. В.
д-р техн. наук, професор, НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна

ФОРМУВАННЯ СУБМІКРОКРИСТАЛІЧНОЇ СТРУКТУРИ В ТИТАНОВИХ СПЛАВАХ МЕТОДОМ ІНТЕНСИВНОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

Титанові сплави широко застосовуються у авіаційному двигунобудуванні завдяки унікальному поєднанню високої питомої міцності, корозійної стійкості та жароміцності. Однак підвищення навантажень на відповідальні деталі сучасних газотурбінних двигунів вимагає подальшого збільшення механічних властивостей титанових сплавів. Можливості класичних механізмів зміцнення (легування, термічна обробка, наклеп) практично вичерпані. Перспективним напрямком є формування субмікрокристалічної (СМК) та наноструктурованої структури методами інтенсивної пластичної деформації (ІПД).

Найбільш критичними деталями газотурбінних двигунів є лопатки вентилятора та компресора, моноколеса, виготовлені зі складнолегованих альфа+бета-титанових сплавів типу ВТ3-1, ВТ8, ВТ8М-1. Ці деталі працюють в умовах складного напружено-деформованого стану при підвищених температурах до 450 градусів Цельсія. Існуюча проблема відновлення ушкоджених деталей методами зварювання пов’язана зі зниженням механічних властивостей у зварному шві до 30% через структурні зміни та дефекти. Це обмежує можливості ремонту та скорочує ресурс дорогих деталей.

Метою даної роботи було встановлення закономірностей формування СМК структури в титанових сплавах методом гвинтової екструзії та розробка технологічних рішень для підвищення механічних властивостей деталей ГТД і їх відновлення зварюванням.

Для досягнення мети були вирішені наступні задачі: визначення оптимальних температурно-деформаційних режимів гвинтової екструзії для титанових сплавів різного хімічного складу; дослідження впливу ІПД на структуру та механічні властивості при статичних та циклічних навантаженнях; розробка присадкових матеріалів з СМК структурою для

відновлення деталей методами зварювання; визначення зон можливого ремонту деталей ГТД з урахуванням напружено-деформованого стану.

Експериментально встановлено, що інтенсивна пластична деформація методом гвинтової екструзії при температурах 700–770 градусів Цельсія для альфа+бета-сплавів та 450–500 градусів Цельсія для альфа-сплавів забезпечує формування СМК структури з розміром структурних складових 200-500 нм незалежно від вихідного стану заготовок (литого чи деформованого). При цьому характеристики міцності підвищуються до 1,5 разів, а границя витривалості при симетричному циклі – до 1,6 разів порівняно з крупнозернистим станом.

Встановлено, що в СМК титанових сплавах температура початку рекристалізації знижується на 180 градусів Цельсія, а температура поліморфного альфа-бета перетворення - на 60 градусів Цельсія порівняно зі стандартним станом. Це дозволило оптимізувати режими термічної обробки для стабілізації СМК структури. Відпал при температурі 350 градусів Цельсія для технічно чистого титану та 650 градусів Цельсія для сплаву ВТ8М-1 забезпечує збереження підвищених характеристик міцності при покращенні пластичності.

Вперше запропоновано використання присадкових матеріалів з СМК структурою для відновлення деталей ГТД методами зварювання. Розроблено два склади модифікованих присадок на основі титану з лантаном, ітрієм та бором, які після гвинтової екструзії мають СМК структуру. Це дозволило усунути хімічну та структурну неоднорідність, пори в зварному шві та підвищити механічні властивості зварних з'єднань: на 8–12 % при одночасному зниженні середньоквадратичного відхилення у 2 рази.

Розроблено методику визначення зон можливого відновлення деталей ГТД з урахуванням напружено-деформованого стану та властивостей зварних зєднань. Встановлено, що використання СМК присадок дозволяє розширити зони можливого ремонту вентиляторної лопатки із сплаву ВТ3-1 на 30% та забезпечити можливість відновлення близько 75 % лопаточної частини осьового моноколеса із сплаву ВТ8. Натурні випробування підтвердили підвищення довговічності відновлених лопаток на 20 % порівняно з використанням стандартних присадкових матеріалів.

Результати досліджень розширюють наукові основи технології механічної обробки та зварювання титанових сплавів. Розроблені технологічні рішення з формування СМК структури методом ІПД та застосування СМК присадкових матеріалів дозволяють підвищити експлуатаційну надійність та ресурс критичних компонентів газотурбінних двигунів.

УДК 620.18.541.18

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

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

ВПЛИВ МОДИФІКУВАННЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ НІКЕЛЕВИХ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ

Відомо, що жароміцні сплави на основі нікелю займають особливе місце в сучасній ракетно-космічна техніці завдяки своїй винятковій жаростійкості, високим механічним властивостям і структурній стабільності при високих температурах та навантаженнях. Ці матеріали складають основу відповідальних компонентів авіаційних і газотурбінних двигунів, а також елементів конструкцій, що працюють в агресивних середовищах та при екстремальних температурах. Надійність, довговічність і ефективність цих систем значною мірою залежать від властивостей використовуваних жароміцних сплавів і, відповідно, від методів їх легування, модифікування та термічної обробки. Одним з ключових напрямків покращення властивостей жароміцних нікелевих сплавів є модифікування, тобто цілеспрямоване введення мікродомішок або ультрадисперсних компонентів, здатних змінювати процеси кристалізації, формування мікроструктури, фазовий склад і морфологію зміцнювальної фази. Зокрема, використання модифікування відкриває величезні можливості для вдосконалення властивостей сплавів з метою адаптації їх до конкретних умов використання. Це особливо важливо в умовах мініатюризації компонентів і зростання робочих температур, коли навіть невелике поліпшення структурних властивостей може призвести до значного збільшення терміну служби компонента. Незважаючи на значну кількість фундаментальних і прикладних досліджень, багато аспектів впливу модифікуючих елементів на мікроструктуру та фізико-механічні властивості нікелевих сплавів залишаються недостатньо вивченими. Подальшого аналізу потребують механізми дії окремих модифікаторів, їх взаємодія з ключовими легуючими елементами та вплив на кінетику фазових перетворень під час термічної обробки. Таким чином, актуальність таких досліджень зумовлена необхідністю поглибленого вивчення впливу модифікування на структуру та властивості термічно оброблених нікелевих сплавів з метою розробки більш ефективних матеріалів нового покоління, що відповідають зростаючим вимогам надійності та довговічності машин.

У даній роботі було досліджено вплив модифікування на мікроструктуру та механічні властивості жароміцного нікелевого сплаву ЖС3ДК-ВІ, який

використовується в деталях ракетно-космічної техніки, що працюють в умовах високих температур і циклічних навантажень. Показано, що введення ультрадисперсних частинок карбонітридів титану [Ti(C, N)] у кількості 0,05 % сприяє формуванню більш рівномірної та дисперсної структури, що зумовлює підвищення ударної в'язкості до 87,5 % порівняно з базовим станом. Встановлено, що модифікування значно зменшує схильність сплаву до утворення крупнозернистих структур та підвищує його тривалу міцність при температурі 850 °C і напруженні 340 МПа, час до руйнування збільшується з 344 до 520 годин. Отримані результати підтверджують доцільність застосування модифікаторів для покращення експлуатаційних характеристик нікелевих сплавів, що використовуються у відповідальних вузлах сучасних ракетних і газотурбінних систем.

УДК 669.295

Харченко А. О.
аспірант, НУ«Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна
Міщенко В. Г.
д-р техн. наук, професор,
НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ОПОРУ МАТЕРІАЛІВ НАДВИСОКОШВИДКІСНІЙ ДЕФОРМАЦІЇ ТА РУЙНУВАННЯ

Опір матеріалу імпульсному удару за видами навантаження і механізмами деформації та руйнування можливо описати характеристиками, які визначаються зовнішними факторами і внутрішніми, котрі виникають в матеріалі. Більша частина енергії при імпульсному навантаженні переходить в теплоту, тому границя міцності і ударна в'язкість матеріалу знижуються, а пластичність зростає.

Тому встановлення температурних залежностей опору деформуванню та руйнуванню металів при надвисикошвидкісному деформуванні нададуть можливості встановити основні механізми пластичної деформації та її попередження.

Відомо, що електроімпульсне оброблення (ЕІО) зменшує температуру початку структурних змін в області високих температур. ЕІО сприяє перебігу двох процесів: високошвидкісній пластичній деформації зсуву і динамічній рекристалізації. Мікропластична деформаця під впливом ЕІО забезпечує підвищену концентрацію дефектів і залишкових мікронапружень попереднім деформаційним обробленням, або хіміко-термічним обробленням поверхні цементованого шару шляхом вторинного твердіння.

Авторами роботи [1] визначений вплив залишкових напружень після поверхнево-пластичного деформування зразків сплаву на величину термо-ЕРС цих зразків.

На зразках із сталі СП-28 дослідженнями встановлено, що зменшенню коефіцієнта термо- ЕРС відповідає збільшенню ступеню контактного деформування.

В авіаційній галузі застосовують броню, головним чином, для захисту від наземного вогню. Тому бронею захищають лише важливі частини літака або гвінтокрила, наприклад, крісло пілота, або двигуни.

Список літератури

1. Залежність термоелектричних характеристик від параметрів структури металів / Лоскутов С. В., Міщенко В. Г., Грешта В. Л. та ін. //Metallophysics and advancedtechologies. – 2024. – 46. – № 12. – С. 1149–1161.

УДК 623.445

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

Стадник С. О.
аспірант НУ «Запорізька політехніка», АО «Мотор Січ»,
м. Запоріжжя, Україна

ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ДЕФОРМАЦІЇ ТА ПОПЕРЕЧНОГО СТИСНЕННЯ НА МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕКСТИЛЬНИХ І КОМПОЗИТНИХ БРОНЕМАТЕРІАЛІВ

Представлено результати експериментальних досліджень механічних властивостей арамідних волокон, тканинних матеріалів та органопластиків на їхній основі при статичному та динамічному розтягуванні, а також при локальному поперечному стисненні (вільному та стесненому). Проаналізовано залежність характеристик від швидкості деформації (у діапазоні до 6 порядків) та вплив попереднього поперечного стиснення на залишкову міцність волокон

Встановлено, що елементарні арамідні волокна поводяться лінійно-пружно до руйнування, а їхні характеристики лише незначно залежать від швидкості навантаження (зростання міцності 6–21%). При цьому для тканин і композитів спостерігається більш суттєва залежність від швидкості деформації (до 30%). Діаграми розтягування тканинних матеріалів є суттєво нелінійними на початковій ділянці, що спричинено вирівнюванням викривлених волокон.

Ключовим висновком, що має практичне значення, є виявлення того, що питома робота руйнування при поперечному стисненні значно більша, ніж при розтягуванні для досліджених органопластиків. При вільному стисненні матеріалів на основі еластичних сполучників спостерігається раптовий «пробій» при критичному тиску $0.95-1.35$ ГПа. При стесненому стисненні матеріали поводяться як більш жорсткі нелінійно-пружні тіла.

Дане дослідження має пряму корисність у проектуванні та оптимізації броньових структур.

Оцінка ресурсу енергопоглинання: Результати показують, що поперечне стиснення є суттєвим ресурсом енергопоглинання броньовою структурою кінетичної енергії вражаючих елементів (ВЕ). Це дозволяє розробникам (конструкторам) цілеспрямовано використовувати цей механізм.

Оптимізація конструкції: Знання поведінки матеріалів при поперечному стисненні (в умовах вільного/стесненого стиснення) дозволяє оптимізувати конструкцію броньового пакета (наприклад, його товщину та слоїсту структуру) для найкращої реалізації потенційних енергопоглинаючих здібностей матеріалу при взаємодії з ВЕ.

Створення математичних моделей: Отримані механічні характеристики та аналітичні вирази, що апроксимують діаграми, необхідні для побудови та верифікації математичних моделей 16161616високошвидкісної взаємодії ВЕ з броньовим захистом.

Порівняння матеріалів: Дослідження дозволяє об'єктивно зіставити різні текстильні матеріали та композити на їхній основі (тканини різних переплетень, типи сполучників) для вибору найбільш ефективних компонентів при розробці нових засобів індивідуального та колективного броньового захисту.

Методи дослідження та результати при розтягуванні

Статичне та Динамічне Розтягування Індивідуальних Волокон:

Проводились випробування на розтягування арамідних волокон марок (А265), Kevlar, Kevlar 129 та Twaron4.

Волокна поводяться лінійно-пружно аж до руйнування при статичних випробуваннях.

Динамічне розтягування: Використовувався метод розрізного ударного стрижня Гопкінсона (стрижень Кольського)6. Швидкість деформації змінювалася на 6 порядків.

Висновок: Механічні характеристики моноволокон незначно залежать від швидкості деформації; зростання осереднених руйнуючих напружень становить лише (6...21) %.

Статичне та Динамічне Розтягування Текстильних Матеріалів та Композитів:

Діаграми статичного розтягування тканин (наприклад, арамідної тканини з ниток Армос) суттєво нелінійні на початковій ділянці (А), що пояснюється вирівнюванням первісно викривлених волокон.

Нелінійні діаграми розтягування тканин апроксимувалися аналітичними виразами на трьох ділянках (А, В, С).

На рівні ниток/жгутів і тканин виявляється суттєва залежність механічних характеристик від швидкості деформування (до 30%).

Пластична течія не передує руйнуванню тканин і композитів.

Висновки роботи поведінка при поперечному стисненні

Локальне Поперечне Стиснення Волокн (вплив на міцність):

Попереднє квазістатичне поперечне стиснення волокон до деформації (70...80) % відносно слабо знижує їхню залишкову міцність при динамічному розтягуванні (зниження 6.3% - 11.5%).

Залишкова міцність арамідної тканини при розтягуванні не залежить від попереднього поперечного стиснення до певного рівня тиску.

Локальне Поперечне Стиснення Тканин та Органопластиків:

Випробування проводились за схемою вільного локального поперечного стиснення.

При вільному стисненні тканин та органопластиків з еластичними сполучниками спостерігається миттєве вичерпання несучої здатності («пробій») при критичному тиску.

Стиснене (обмежене) стиснення: Матеріал тестується в циліндрі, що перешкоджає видавлюванню.

При стисненому стисненні матеріали поводяться як більш жорсткі та як нелінійно пружні тіла; явища "пробою" не спостерігається.

Удільна робота руйнування при поперечному стисненні значно більша, ніж при розтягуванні. Це вказує на те, що поперечне стиснення може бути суттєвим ресурсом енергопоглинання броневою структурою.

Список літератури

1. Cheng, M., Chen, W., & Weerasooriya, T. (2010). High strain rate tensile properties of single PPTA and aramid co-polymer fibers. Journal of Materials Science, 45(3), 652–661.

2. Singletary, J., Davis, H., Ramasubramanian, M. K., Knoff, W., & Toney, M. (2000). The Transverse Compression of PPTA Fibers. Journal of Materials Science, 35, 573–581.

УДК 621.785.669.14

Корнієнко В. В.
аспірант кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Євсєєва Н. О
канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автомобілів, теплових двигунів та гібридних енергетичних установок НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

РОЗВІТОК РУЙНУВАННЯ ВНУТРІШНЬОЇ ПОВЕРХНІ РЕАКТОРІВ У ПРОЦЕСІ МАГНІЄТЕРМІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА ТИТАНУ

Магнієтермічний метод отримання титану, реалізований у реакторах (ретортах) періодичної дії, забезпечує промислове виробництво титану у вигляді губчастого матеріалу (губки). Вимоги до якості виплавлених титанових зливків є надзвичайно високими. Водночас, технологія характеризується рядом суттєвих обмежень – циклічністю процесу, можливістю забруднення губки, значними витратами енергії на розігрів реактора перед кожною операцією відновлення та вакуумної сепарації, а також деформацією корпусів реакторів, що скорочує їхній ресурс експлуатації. Останнім часом спостерігається підвищений інтерес до досліджень і розроблення новітніх матеріалів, в тому числі призначених для виготовлення корпусів реакторів магнієтермічного виробництва титану.

Термін служби реакторів значною мірою залежить від вибору матеріалів з яких вони виготовлені. Реактори магнієтермічного виробництва титану з продуктивністю 1000…4000 кг зазвичай витримують близько 35 циклів роботи. У зоні, наближеній до області реакції, матеріал реактора зазнає комплексного впливу агресивних чинників, що спричиняє інтенсивне зношування стінок обичайки. На внутрішню поверхню діють розплави хлориду магнію ($MgCl_2$), металевого та рідкого магнію (Mg), а також пари тетрахлориду титану ($TiCl_4$). Зовнішня поверхня одночасно піддається впливу високих температур – 1000…1200 °С, розпеченої повітряної атмосфери печей відновлення та сепарації, яка містить домішки хлору.

Процес видовження обичайки апаратів із одночасним витоншенням стінок, який обумовлений пластичною деформацією, хоча і не призводить до необоротної втрати металу, але суттєво скорочує термін їхньої служби. На витоншення стінок впливають два ключові чинники: гаряча деформація обичайок реторт під дією сумарного навантаження, яке створюється масою відновника – рідкого магнію (Mg) і активної частини реактора та корозією внутрішньої і зовнішньої поверхні реакторів, яка посилюється на останніх циклах експлуатації через зменшення перерізу обичайки [1–2]. Стійкість

стінок реакторів до корозійного руйнування визначаєиться шляхом аналізу зміни їхньої товщини, видовженням та втратою їхньої маси після кожного циклу (рис. 1).



Рисунок 1 – Формозмінення реактора

Температура зовнішньої стінки реактора змінюється залежно від операцій технологічного процесу відновлення тетрахлориду титану магнієм. Підтримка високої температури зовнішньої стінки в межах 920…1030 °С запобігає кристалізації дихлориду титану з розплаву хлориду магнію, зменшує гарнісажну частину блоку та забезпечує повне відновлення нижчих хлоридів титану [3].

Найпоширенішими є реактори з нижнім зливом хлориду магнію та верхнім конденсатором, який використовують у процесі вакуумної сепарації (рис. 2). На сучасному етапі в Україні та за кордоном застосовують реактори зі сталі марки 05Х18Н10Т, діаметром близько 1000–1950 мм та висотою 3000–4000 мм. Проте використання хромонікелевих сталей для виготовлення реторт не забезпечує належного рівня якості титанової губки та не гарантує тривалого ресурсу експлуатації реактора.

Перевагою сталі 09Х3НМ3ФБч є збільшення ресурсу газотурбінних двигунів та установок в умовах зростання силової потужності двигунів, при зменшенні або збереженні геометричних розмірів вузлів. Хіміко-термічне та термічне оброблення дослідної сталі 09Х3НМ3ФБч скорочує тривалість процесу і, відповідно, зменшує витрати на оброблення. Контактна витривалість вища майже в 50 разів у порівнянні із сталями серійного виробництва за рахунок зменшення кількості первинних карбідів МС, M_3C та M_7C_3 в цементованому шарі.

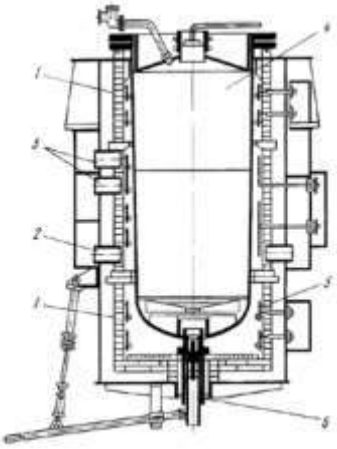


Рисунок 2 – Схема апарата (реактора) відновлення, розміщеного в шахтній електропечі:
1 – електропіч; 2 – канал для відведення гарячого повітря; 3 – фурми для подавання холодного повітря; 4 – апарат відновлення; 5 – нагрівачі; 6 – зливна труба

Актуальним залишається завдання пошуку ефективних варіантів часткової або повної заміни у конструкційних сталей з високим вмістом никелю на біметали.

Список літератури

1. Мищенко В.Г. Ползучесть как определяющий фактор увеличения срока эксплуатации реакторов магниетермического производства титана / В. Г. Мищенко, Н. А. Евсеева // Фізико-хімична механіка матеріалів. – 2012. – Т. 48. – № 2. – С. 119–122.

2. Мищенко В. Г. Анализ физико-химического взаимодействия компонентов стали со средой восстановительного процесса получения титана / В. Г. Мищенко, Н. А. Евсеева // Вісник двигунобудування. – 2009. – № 2. – С. 120–122.

3. Mishchenko, V. Steel corrosion resistance in the technological process / V. Mishchenko, N. Evseeva, S. Shejko, V. Shalomeev // Materials Science and Technology Conference 2019 (MS and T 2019): Proceedings, September 29–October 3, 2019. – Portland, Oregon. (Scopus)

УДК 621.785.669

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

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

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ НИЗЬКО ВУГЛЕЦЕВОЇ ЦЕМЕНТОВАНОЇ СТАЛІ

Температуро-енергонавантаженість зубчастих коліс авіаційних редукторів сучасного виробництва неухильно зростає. Тому для виготовлення для підшипників та зубчастих коліс застосовують сталі з якомога більшою теплостійкістю і працюватимуть в більш жорстких температурних умовах при збереженні розмірів деталей та вузлів редукторів (табл. 1).

Таблиця 1 – Хімічний склад теплостійких сталей

Марка сталі	Вміст легувальних елементів, %									
	C	Cr	Mn	Si	Ni	Mo	W	V	Nb	РЗМ
13Х3НМ2ВФ	0,1 0,16	2,7 3,2	0,4 0,8	≤0,6	0,8 1,2	1,6 2,1	0,6 0,9	0,15 0,3	-	-
13Х3Н3М2ВФБ	0,1 0,15	3,0 3,4	0,3 0,6	0,17 0,37	2,7 3,0	1,9 2,3	0,2 0,5	0,05 0,15	0,5 0,15	≤0,04
13Х4НЧМ4Ф (М50NiL)	0,13	4,0	0,3	0,25	3,5	4,25	-	1,2	-	-
09Х3НМ3ФБч	0,1	2,9	0,48	0,34	1,44	2,99	-	0,33	0,3	0,05

Хіміко-термічне оброблення проводили на вторинне твердіння з використанням печей SIEMENSI ACEA. Режим хімікотермічного оброблення сталі 09Х3НМ3ФБч відповідноТУ27.1-0018536-0052046 [1]. Порівняльні дослідження механічних властивостей проводили на АТ «Мотор Січ» (табл. 2.)

Перевагою сталі 09Х3НМ3ФБч є збільшення ресурсу газотурбінних двигунів та установок в умовах зростання силової потужності двигунів, при зменшенні або збереженні геометричних розмірів вузлів. Хіміко-термічне та термічне оброблення дослідної сталі 09Х3НМ3ФБч скорочує тривалість процесу і, відповідно, зменшує витрати на оброблення. Контактна витривалість вища майже в 50 разів у порівнянні із сталями серійного виробництва за рахунок зменшення кількості первинних карбідів МС, M_3C та M_7C_3 в цементованому шарі.

Таблиця 2 – Механічні властивості

Марка сталі	σв, МПа	σ02, МПа	δ, %	ψ, %	HRC	KCU, МДж/м2	HRC*	σ2*, МПа
13Х3НМ2ВФ	1380 1490	970 1100	14 20	56 63	42 44	0,5 0,77	58 60	-
13Х3Н3М2ВФБ	1350 1450	1150 1300	-	-	42 44	0,7 1,1	≥60	73 (при σ2=2300МПа)
13Х4НЧМ4Ф	1375	1167	15	-	43 45	60 (К1с МПа/м2)	≥60	78 (при σ2=2300МПа)
09Х3НМ3ФБч	1210 1300	-	16 18	58 61	39,5 41	0,95 1,15	61	101 (при σ2=3500МПа)

HRC* – цементованого шару (гаряча твердість),
σ_2^* – контактна витривалість 10^6 циклів.

Список літератури

1. Міщенко В. Г. Дослідження структури та властивостей вторинноутвердіючих цементованих сталей / Міщенко В. Г., Меняйло О. І., Багрійчук О. С. //Матеріалознавство і термічна обробка металів. – 2013. – № 2–3. – С. 48–53.

УДК 669.620

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

Кононенко Ю. І.
старший викладач кафедри ФМ, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

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

Скребцов А.А.
канд. техн. наук, доцент каф. ТПМ,
НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН ДЕГРАДАЦІЇ СПЕЧЕНИХ ЗАГОТОВОК ІЗ СУМІШІ ПОРОШКІВ ТИТАН-ГІДРОКСИАПАТИТ

Розробка заготовок для імплантатів, фізико-механічні властивості яких максимально наближені до властивостей людської кісткової тканини, є нагальною проблемою сучасної біоінженерії та матеріалознавства. Особливо актуальною ця проблема стала в реаліях сьогодення. Головна вимога до матеріалів імплантатів полягає у необхідності забезпечення ними такого модуля пружності (модуля Юнга), який би був співмірним з показниками кістки, що заміщується. Це є критично важливим для запобігання феномену стрес-шильдінгу (stress shielding).

Окрім регламентованого рівня пружності, механічні характеристики матеріалів мають бути достатніми для гарантування надійності та експлуатаційної безпеки конструкції імплантата протягом всього терміну служби. До цих вимог також додається обов'язкове забезпечення біосумісності матеріалу з біологічним середовищем організму пацієнта. Успішне розв'язання цих складних задач потребує застосування системного підходу до процесу розробки матеріалу заготовок.

Поліпшення біосумісності може бути досягнуте завдяки використанню гідроксиапатиту (ГАП) [1, 2], який є біоактивним мінеральним компонентом

природної кістки. Традиційно ГАП застосовується як біоактивне покриття, що наноситься на поверхню готового виробу за допомогою спеціалізованих технологічних методик. Відомо, що з метою забезпечення остеоінтеграції, матеріал заготовки для імплантату повинен мати структуру із розвиненою пористістю. Однак кількість пор визначає модуль пружності (модуль Юнга), а тому повинна бути регламентована. Для посилення біоактивності та стимуляції росту кістки, шар ГАП має бути розташований всередині цих пор.

Додавання ГАП до металевих порошків може призвести до зміни характеристик пористості при виробництві матеріалу за порошковою металургією. Тому, в роботі було на меті дослідити процес структуроутворення при спіканні суміші порошків титан-ГАП та визначити схильність до деградації цього матеріалу впродовж часу.

З метою забезпечення гомогенного розподілу компонентів у суміші, було здійснено змішування комерційного порошку титану (марки ПТ) та порошку ГАП однакової фракції. Використовували лабораторний змішувач шейкерного типу. У межах експерименту було підготовлено серію сумішей із варіюванням масового вмісту ГАП від 5 % до 25 % із кроком 5 %. Формоутворення заготовок здійснювали методом одноосьового пресування із питомим тиском 350 МПа, що є необхідною умовою для отримання регламентованого рівня пористості і, як наслідок, модуля пружності. Спікання проводилося у вакуумній печі з ізотермічною витримкою при температурі 1200 °С протягом 4 годин.

За допомогою лінійного методу Розіваля проводили оцінку пористості отриманих зразків. Встановлена пряма кореляційна залежність між вмістом ГАП в суміші та загальною пористістю кінцевого матеріалу: зі зростанням концентрації ГАП частка пор збільшується. Спочатку, при підвищенні вмісту ГАП від 5 % до приблизно 15 %, об'ємна кількість пор зростає від 44 % до 50 %, причому цей приріст є поступовим і відносно невеликим. Однак, після досягнення 15 % вмісту ГАП спостерігається різке падіння пористості до 40 % при вмісті 20 % ГАП. Це може свідчити про зміну механізму формування структури або про досягнення критичної концентрації ГАП. Далі, при подальшому збільшенні вмісту ГАП до 25 %, пористість знову різко зростає, досягаючи найвищого значення близько 60% у всьому дослідженому діапазоні.

Зразки помістили у вакуумну упаковку та залишили на тиждень з метою визначення можливої деградації матеріалу. Візуальний огляд через тиждень дозволив встановити, що зразки, що містили понад 10 % ГАП в початковій суміші зазнали деградації і почали руйнуватися. Деградація до повного руйнування пройшла впродовж наступного тижня. Виявлено, що зі збільшенням ГАП в початковій суміші ступінь деградації збільшувався. Критичним вмістом у суміші порошків з точки зору повного руйнування зразків була визначена концентрація ГАП, що дорівнювала 10 %.

Встановлені явища пояснюються взаємодією між частинками титанового порошку та ГАП під час процесу спікання. Коли сформовану заготовку піддають спіканню, відбуваються процеси дифузії та рекристалізації, що забезпечують міцний контакт порошинок разом із ростом зерен α-фази титану. Однак частинки ГАП виступають як інгібітор дифузійних процесів, оскільки вони та титан мають різний характер походження. Чим більшою є об'ємна частка ГАП, тим частіше ці частинки перешкоджають з'єднанню та спіканню частинок титану. Як наслідок, збільшення його вмісту призводить до формування більшої кількості неспечених частинок разом із збільшенням загальної об'ємної пористості кінцевого матеріалу. Неспечені частинки внаслідок відсутності дифузійного контакту через певний час деградують та «розсипаються», а пори, що знаходилися поруч, підвищують швидкість цього процесу. Отже, кількість ГАП вище за критичну призведе до руйнування металу.

Висновки

1. Отримано спечені зразки із комерційних порошків титану марки ПТ та ГАП однакової фракції із різним вмістом останнього.

2. Проведено оцінку об’ємної частки пор. Встановлено, що зі збільшенням вмісту порошку ГАП, частка пор збільшується. Так, для 5 % вмісту вона складала 44,7 % в той час, як для 25 % порошку ГАП вона склала майже 60 %, тобто збільшилась на 15 %.

3. Встановлено, що критичним вмістом у суміші порошків є концентрація ГАП у 10 %.

Список літератури

1. Модифікації поверхні титанових імплантатів високоінтенсивними концентрованими джерелами нагріву / Шаркаль Й. П., Січка М. Ю., Потапчук А. М. та ін. // Імплантологія Пародонтологія Остеологія. – 2007. – С. 79–84.

2. Потапчук, А. М. Вплив структури поверхні імплантатів на процеси остеоінтеграції (огляд літератури) / Потапчук А. М., Криванич В. М. // Інновації в стоматології. – 2015. – №1. – С. 82–88.

УДК 621.787, 621.794.61

Мордюк Б. М.
д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співробітник, Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, м. Київ, Україна

Малінін В. Ю.
аспірант, Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, м. Київ, Україна

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

ВЛАСТИВОСТІ ПОКРИТТІВ, СФОРМОВАНИХ ПЛАЗМОВИМ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИМ ОКСИДУВАННЯМ, НА СПЛАВІ Д16Т ПІСЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО УДАРНОГО ОБРОБЛЕННЯ

Алюмінієві стопи та композити на їх основі належать до найважливіших конструкційних матеріалів завдяки їхній високій питомій міцності. Висока технологічність дозволяє виготовляти вироби як традиційними методами (литво, пластичне деформування, різання), так і сучасними адитивними методами тривимірного друку. Галузі застосування алюмінієвих стопів: авіабудівна, аерокосмічна, автомобільна, кораблебудівна тощо. Однак, низька зносостійкість деталей із вказаних стопів обмежує сфери їх застосування, тому виникає потреба в модифікації поверхні.

Серед методів модифікації поверхні алюмінієвих стопів можна виділити інтенсивну поверхневу пластичну деформацію під час тертя спеціального інструменту, шротоструминного та ультразвукового ударного оброблення, формування поверхневих композитів, а також формування оксидних покриттів і нанесення металевих покриттів для захисту від корозії та зношування. Серед способів формування оксидних покриттів слід виділити плазмове електролітичне оксидування (ПЕО), передову технологію, яка дозволяє вирощувати керамічні покриття на поверхнях низки металів вентильної групи (алюміній, титан, цирконій, магній, та їх стопи). На відміну від традиційного твердого анодування ПЕО є однією з екологічно чистих технологій [1]. Однак, технологічний процес ПЕО повинен бути оптимізований з урахуванням обраної марки деформованого алюмінієвого сплаву та залежно від бажаних експлуатаційних властивостей деталей, покритих керамічними покриттями.

Метою даної роботи є розроблення процесу комбінованого зміцнення алюмінієвих деталей із стопу Д16Т (2024) ультразвуковим ударним обробленням і подальшим плазмовим електролітичним оксидуванням та дослідження властивостей одержаної композиції.

Попередню модифікацію поверхні зразків здійснювалась ультразвуковим ударним обробленням за нормального прикладення ударного навантаження на установці УЗГ-300, яка містить ультразвуковий генератор, вібратора зі східчастим концентратором і бойок із загартованої сталі ШХ15 [2]. ПЕО проводили на установці, яка містить джерело живлення змінного струму, систему циркуляції та дозволяє формувати оксидні покриття на деталях у проточному електроліті. Використовували силікат-лужний електроліт на водній основі, покриттів за різних параметрів процесу оксидування [3].

Мікротвердість вимірювали на приладі ПМТ-3. Для випробовування на зношування застосували універсальну машину тертя УМТ-1. Величину втрати ваги внаслідок зношування зразків визначали гравіметричним методом: Мікроструктуру покриттів досліджували на растровому електронному мікроскопі TESCAN Vega3 SBH. Параметри поруватості покриттів оцінювали, аналізуючи РЕМ зображення мікроструктури за допомогою комп'ютерної програми.

Результати експериментальних досліджень показали, що попереднє ультразвукове ударне обробляння перед плазмовим електролітичним оксидуванням призводить до зменшення поруватості та розмірів пор та покращення властивостей ПЕО покриття: зростання мікротвердості (~22 ГПа) та зменшення зношування W (~18 мг) оксидного покриття.

Дослідження виконано завдяки фінансуванню Національним фондом досліджень України (National Research Foundation of Ukraine), грант № 2023.04/0160, (0124U003748): «Розробка технології формування жаростійких покриттів методом плазмового електролітичного оксидування на деталях авіаційної та ракетно-космічної техніки».

Список літератури

1. Introduction to Plasma Electrolytic Oxidation-An Overview of the Process and Applications // Coatings. – 2020. – 10(7). – 628 p. https://doi.org/10.3390/coatings10070628

2. Ultrasonic Impact Treatment: Assessing the Process Energetics / Chenakin, S.P., Mordyuk, B.M., Khripta, N.I., Malinin, V.Yu. // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2023. – 45 (9). – P. 1109–1123. https://doi.org/10.15407/mfint.45.09.1109

3. 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. – 6(1). – P. 146–167. https://doi.org/10.3390/ceramics6010010

УДК 621.396

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

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

Піроженко О. О.
старший викладач, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Онищенко В. Ф.
канд. фіз.-мат. наук, доцент, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

МЕТОДИКА РЕАЛІЗАЦІЇ ПРИЙМАЧА СИГНАЛІВ LORA НА ОСНОВІ SDR HACKRF ONE ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМНОГО ІНСТРУМЕНТАРІЮ GNU RADIO

Сигнали LoRa використовують під час роботи БПЛА, тому для ефективного управління, контролю та знешкодження небезпечних проявів вкрай важливо розібратися у методах реалізації приймачів та передавачів LoRa-сигналів.

Одним з найбільш економічних, компактних та простих у використанні є SDR-пристрої типу HackRF One, документація до яких знаходиться у відкритому доступі. Такі SDR можна програмувати наприклад за допомогою програми GNU Radio.

GNU Radio пропонує широкий спектр інструментів для обробки сигналів та взаємодії з HackRF One. Цей програмний інструментарій дозволяє створювати власні радіосистеми для обробки радіосигналів, а також підтримує різноманітні формати сигналів, включаючи аналогові та цифрові модуляції. Користувачі GNU Radio можуть створювати графічні схеми, які визначають потік обробки сигналу, використовуючи готові блоки та інструменти, доступні у бібліотеці GNU Radio. Це дозволяє легко створювати та налаштовувати радіосистеми за допомогою візуального інтерфейсу.

Реалізуємо приймач LoRa-сигналів на базі HackRF One із використанням програми GNU Radio, адже окрім відносної простоти використання, широкого функціоналу та можливості додавати бібліотеки з блоками та інструментами, цю програму легко встановити та використовувати на операційній системі Ubuntu.

Після встановлення GNU Radio на Ubuntu, за допомогою елементів, доступних у бібліотеці, зберемо приймач.

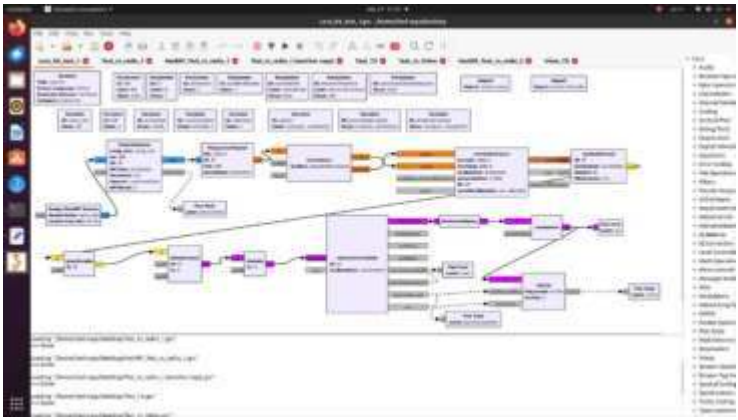


Рисунок 1 – Приймач LoRa-сигналів у GNU Radio

Серед блоків ми бачимо сам HackRF One, підключений до комп'ютера, ресемплер, детектор, блок для налаштування частоти тощо та елементи, що створюють візуальне відображення сигналу (Waterfall, Time Sink, Frequency).

Випромінимо реальний LoRa-сигнал за допомогою системи «приймач-передавач LoRa» на реальних пристроях.

Поки система випромінює сигнал LoRa, запустимо зібраний на комп'ютері віртуальний приймач та приймемо цей сигнал на HackRF One. Перед нами з'явиться візуалізація як на рисунку 2.

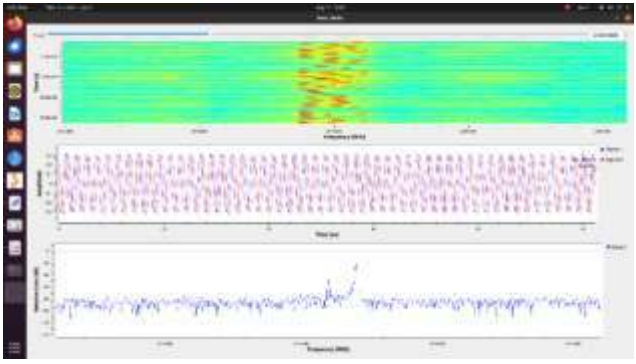


Рисунок 2 – Візуалізація сигналу LoRa у GNU Radio

У верхній третині рисунку можна побачити чірпи LoRa: вони відображені червоним.

УДК 621.396

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

Пироженко О. О.
старший викладач, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

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

Онищенко В. Ф.
канд. фіз.-мат. наук, доцент, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

СИСТЕМА ВИЯВЛЕННЯ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ НА БАЗІ SDR З ВИКОРИСТАННЯМ ЧАСТОТНО МОДУЛЬОВАНИХ СИГНАЛІВ

Стрімке поширення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) як у цивільній, так і у військовій сферах зумовлює потребу в нових підходах до їхнього виявлення та контролю. У цьому контексті особливо актуальним стає створення доступних і мобільних радарних комплексів, здатних точно визначати координати та швидкість невеликих повітряних об’єктів. Сучасні технології дають змогу поєднати можливості програмно-визначених радіосистем (SDR) із сучасними методами обробки сигналів, що відкриває можливості до розробки адаптивних радарів під конкретні прикладні завдання.

Мета цієї роботи полягає у створенні та дослідженні прототипу радарної системи класу FMCW (Frequency-Modulated Continuous Wave), призначеної для виявлення малорозмірних повітряних цілей, зокрема дронів. Ключовими перевагами розробленої системи є використання недорогих компонентів, компактність та можливість її відтворення.

Основним принципом роботи радарів є визначення параметрів простору шляхом аналізу відбитих від об’єкта електромагнітних хвиль. Радари поділяються на імпульсні та безперервні (CW). Імпульсні системи забезпечують високу точність визначення дальності завдяки значній часовій роздільній здатності, проте потребують складних схем для формування потужних коротких імпульсів і характеризуються меншою енергоефективністю. Радари з безперервним випромінюванням аналізують доплерівський зсув, що дозволяє точно вимірювати швидкість, але не дає можливості безпосередньо оцінити дистанцію до цілі. Для усунення цього

недоліку використовується FMCW-технологія, у якій частота переданого сигналу змінюється лінійно (рис. 1).

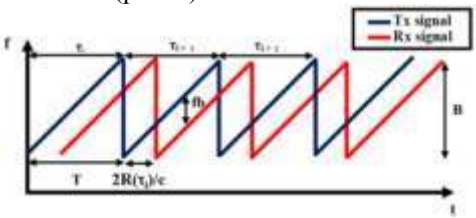


Рисунок 1 – Приклад відправленого та відбитого сигналів за допомогою частотної модуляції

Порівняння випроміненого та прийнятого сигналів дозволяє отримати так звану биттєву частоту, яка прямо залежить від затримки поширення хвилі та, відповідно, відстані до об'єкта.

FMCW-радари забезпечують оптимальний баланс між точністю, енергоефективністю та простотою апаратної реалізації, що робить їх особливо придатними для задач ближнього радіолокаційного виявлення, наприклад, для детекції дронів у складних умовах.

Система FMCW-радару на основі SDR включає вибір відповідного апаратного забезпечення, конфігурацію передавання та прийому сигналів, а також реалізацію цифрової обробки даних. Центральним елементом системи є SDR-платформа HackRF у поєднанні з генератором ADF4159, що забезпечує формування частотно-модульованих сигналів типу чирп (CHIRP – Compressed High-Intensity Radiated Pulse) із заданими параметрами.

Запропонована FMCW-радарна система на базі HackRF дає змогу ефективно виявляти малорозмірні БПЛА, відрізняється низькою собівартістю та високою мобільністю завдяки мінімізації апаратних компонентів і використанню програмної обробки сигналів.

УДК 621.396.98

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

Бугров О.Є.
інженер, військовослужбовець НГУ, Україна

МЕРЕЖА АКУСТИЧНОЇ ФІКСАЦІЇ УДАРНИХ ДРОНІВ МЕТОДОМ ТРИАНГУЛЯЦІЇ

У сучасних умовах ведення бойових дій ворожі ударні безпілотні літальні апарати завдають великої шкоди. Особливої актуальності набуває розробка систем раннього попередження, здатних виявляти дрони на підльоті в режимі реального часу. Одним із перспективних підходів до виявлення дронів є використання акустичної локації за допомогою аналізу звуку, який створює працюючий двигун дрона. Такий метод дозволяє виявляти повітряні цілі за умов відсутності прямої видимості, що критично важливо в міських умовах та при складному рельєфі місцевості. Метою дослідження є розробка і випробування прототипу системи для акустичної фіксації ударних дронів із використанням мережі мікрофонних детекторів, які взаємодіють між собою та здійснюють триангуляцію для визначення координат джерела звуку (дрона).

Досліджується акустична сигнатура дронів із бензиновим двигуном (зокрема, типу Shahed-136). Розроблено методику визначення напрямку та відстані до джерела звуку за допомогою кількох просторово рознесених детекторів. В процесі дослідження проаналізовано переваги і слабкі місця акустичного підходу; розроблено фізичну конструкцію детектора з урахуванням захисту від погодних умов; реалізовано систему збору даних з чотирьох цифрових мікрофонів (INMP441) на базі ESP32; здійснено фільтрацію сигналу для виділення характерного спектра дрона; організовано обмін між детекторами по MQTT для централізованого обчислення координат джерела; оцінено точність визначення напрямку, відстані та висоти польоту джерела звуку.

Практична цінність полягає у створенні масштабованої системи акустичного моніторингу, яка може ефективно доповнювати інші засоби протидії БпЛА, для застосування при побудові повноцінних систем ППО короткої дальності, зокрема, при захисті критичної інфраструктури.
УДК 621.396.946, 621.397.7-182.3

Хобот Н. П.
НВФ «Агрохобот», м. Запоріжжя, Україна

НАЗЕМНА СТАНЦІЯ КЕРУВАННЯ ДРОНАМИ «ЖИРАФА»

Дистанційно керована зброя дозволяє зберігати життя військовослужбовців й істотно підвищує ефективність бойових дій. Дрони стали поширеною зброєю для знищення ворожих живої сили й техніки, опорних пунктів й складів боєприпасів тощо. Дистанційно керовані повітряні апарати використовуються або в якості ударної чи транспортної авіації, або для аеророзвідки. Там, де це можливо, за допомоги дронів наносять удари за статичними координатами (у тому числі, - з наступним самонаведенням). А де це неможливо - використовується дистанційне керування з метою наведення на ціль оператором.

Щоб не втратити керування дроном, необхідно дотримуватись кількох дистанцій: а) максимальної дальності польоту; б) максимальної відстані, на яку він може відлетіти в бік від прямої лінії оператор-об'єкт; в) мінімальної висоти польоту. Необхідність враховування цих трьох параметрів обумовлена тим, що використання безпілотних літальних апаратів передбачає наявність пульта оператора й об'єкта, яким треба керувати що у ближній зоні, що на відстані у десятки й сотні кілометрів. Для здійснення такого керування використовуються електромагнітні хвилі метрових й дециметрових діапазонів хвиль, які поширюються, в основному, у межах прямої видимості.

В супереч поширеним у вузьких колах думкам, Земля - не плоска, а має форму сфероїда. Окрім того, відносна діелектрична проникність тропосфери зменшується за висотою. Тому спостерігається явище рефракції - траєкторія поширення радіохвиль викривляється з переважним її відхиленням у бік Землі. З урахуванням рефракції, дальність радіовидимості збільшується, приблизно, на 15% порівняно до оптичної дальності (прямої видимості) і визначається відомою формулою:

$$D \approx 4{,}1 \cdot (\sqrt{H} + \sqrt{h}) \text{, км,} \qquad (1)$$

де H – висота розташування передавальної антени, м;
h – висота розташування приймальної антени, м.

Відповідно до (1), з метою збільшення максимальної дальності зв'язку або зменшення мінімальної висоти польоту (на середніх й великих дальностях) дрона, необхідно все вище піднімати антенний блок 1: на стаціонарну споруду (вежу, будівлю тощо) або переносну телескопічну щоглу 4 (див. рис. 1). Окрім того, це сприяє збільшенню відношення сигнал/шум на вході приймачів (як наземних, так й бортових), що, у свою чергу, позитивно впливає на якість відтворення зображення з бортової відеокамери на виносному робочому місці

оператора дрона 5. Альтернативним шляхом поліпшення цього відношення є збільшення площі (розмірів) антен, що неминуче призводить до збільшення маси антенного блоку й навантаження опорно-поворотного пристрою 3 (варіанти виконання: до 10 кг й більше).



Рисунок 1 – Наземна станція керування дронами «Жирафа»:
1 – антенний блок, 2 – фідер, 3 – опорно-поворотний пристрій, 4 – щогла,
5 – виносне робоче місце оператора, 6 – відеомоні-тор, 7 – монітор сканера
відеочастот «Яструб», 8 – контролер віддаленого налаштовування відео-приймачів,
9 – пристрій запису на microSD, 10 – пульт керування пристроєм 3, 11 – акумулятор

Оскільки саме щогла видає позицію оператора дрона (або її висота, або випромінювання передавальної антени в радіоефірі), то довжина фідера 2 (від кількох десятків до кількох сотень метрів) мусить забезпечити роботу оператора з підземного або віддаленого ландшафтного укриття. Для запобігання втрат потужності корисних сигналів, приймачі й передавачі розташовано безпосередньо на антенному блоці. Додаткові високочастотні й відео- підсилювачі забезпечують формування якісного зображення, що дозволяє керувати дроном не лише у масці (окулярах), а й на 15"..17" моніторі 6 (без синього екрану). Пристрій 9 дозволяє здійснювати запис на microSD відео з монітора 6.

Для завчасного попередження про наближення ворожого FPV-дрона до наземної станції, її обладнано сканером частот «Яструб»: усі виявлені на різних частотах відеотечії можна переглядати на окремому моніторі 7.

Виведення антенного блоку на потрібні кути у двох площинах, а також довертання антени за дроном під час його виходу за межі ширини діаграми гостроспрямованої антени (маневрування у бік) може здійснюватись вручну за допомоги пульта 10 або в автоматичному режимі.

УДК 621.397.7-182.3

Хобот Н. П.
НВФ «Агрохобот», м. Запоріжжя, Україна

ПОСТАНОВНИК АКТИВНИХ ШУМОВИХ ЗАВАД «ЇЖАК»

Радіоелектронна боротьба (РЕБ) – це дія, яку створюють постановники завад. Постановники активних шумових або модульованих завад широко застосовуються для захисту від ударів з повітря дистанційно керованими радіоканалом FPV-дронами стаціонарних наземних об’єктів, військової техніки, особового складу тощо.

Постановник активних шумових завад «Їжак» випускається у чотирьох варіантах виконання: автомобільний, окопний, переносний, універсальний.

Автомобільний варіант складається з передавача й антенного блоку (див. рис. 1). Його конструкція забезпечує можливість легкого зняття з даху кабіни (й так само легкого встановлення назад) валізи разом з випромінювачами або окремо.



а *б*

Рисунок 1 – Автомобільний постановник активних шумових завад «Їжак»: передавач (*а*) й антенний блок (*б*)

Для захисту антенного блоку від ударів гілок, його загратовують арматурою з композиційних радіопрозорих матеріалів (див. рис. 1, *б*)). Для створення захисного електромагнітного поля навколо автомобіля, застосовуються квадрифілярні антени Моксона власного виробництва з коефіцієнтами підсилення від 13 дБ й широкими однопелюстковими діаграмами спрямованості (від 40°), що гарантує відсутність випромінювання високочастотної потужності передавача шкідливого для здоров’я людей рівня бічними пелюстками прямо в кабіну.

Оскільки в одній валізі передавача може розташовуватись до 7 генераторних модулів по 30..300 Вт кожний, то, для їхнього надійного

охолодження за спекотних літніх температур, встановлюються додаткові зовнішні радіатори охолодження з вентиляторами (див. рис. 1*а*)).

Вимоги до надійності роботи багаточастотного багатомодульного передавача вимагають невпинного контролю його параметрів. Тому під час роботи здійснюється внутрішня самодіагностика наявності відмов (виходу з ладу) генераторних модулів, визначення рівня розряду батареї, температура нагріву модулів тощо.

З метою заощадження заряду акумулятора, передбачено по-модульне увімкнення випромінювання у потрібних смугах частот в ручному або автоматичному (наприклад, від сканера частот) режимах.

Під час роботи, постановник завад «Їжак» забезпечує:

- дистанційне керування режимами роботи;
- щільне зашумлювання частот у смузі (без пропусків);
- сталість щільності потужності зформованої шумової активної завади, не зважаючи на поступове розряджання акумулятора.

Для цього, характеристики кожного генераторного модуля перевіряються на аналізаторі спектра й вимірювачеві потужності.

Якщо мобільній групі частину шляху доводиться долати пішки, то автомобільний постановник виконується у вигляді набору малогабаритних складових, які розподіляються між бійцями. Переносний варіант постановника шумових завад «Їжак» має вигляд ранця чи валізи (див. рис. 2*а*)). Універсальне виконання автомобільного постановника складається з блоків (див. рис. 2*б*)), які легко виймаються й перекладаються до ранців.



а



б

Рисунок 2 – Постановник завад «Їжак»: переносний (*а*) й універсальний (*б*)

УДК 621.397.7-182.3

Хобот Н. П.
НВФ «Агрохобот», м. Запоріжжя, Україна

ДЕТЕКТОР (СКАНЕР) ВІДЕОСИГНАЛУ З FPV-ДРОНІВ «ЯСТРУБ»

Для віддаленого керування об'єктом, на ньому треба мати або пристрій позиціонування, або відеокамеру. Останній варіант – найпростіший для відстежування положення апарата з високим розділенням, через що FPV-дрони набули такої популярності.

Під час роботи, зображення з бортової відеокамери транслюється радіоканалом, обробляється відеоприймачем й відображається на екрані (в окулярах чи масці) робочого місця оператора безпілотного літального апарата. Якщо відеосигнал з камери передається у незашифрованому вигляді, то цим створюються сприятливі умови для його перехоплення. Послідовно перелаштовуючи відеоприймача, можна виявити усі частоти, на яких в даний момент здійснюється відеотрансляція. З метою автоматизації цього процесу, створюються сканери відеосигналу з FPV-дронів.

Детектор (сканер) відеосигналу з FPV-дронів «Яструб» – власна розробка (див. рис. 1) з наступними характеристиками:

- виявлення відеосигналів стандарту PAL/NTSC;
- відтворення незашифрованих відеосигналів;
- діапазони робочих частот:
  а) 1000…1900 МГц;
  б) 2800…4400 МГц;
  в) 4800…6200 МГц;
- кількість приймачів: до 3 шт.;
- монітор: 7";
- час автономної роботи: залежить від ємності акумулятора.

Детектор (сканер) «Яструб» має два варіанти виконання: портативний та вбудований. Недоліком пристрою першого типу є обмеженість дальності дії через низьковисотне (не вище 2 м) розташування антен. Поліпшити цей параметр можна шляхом застосування або потужного підсилювача (що зменшує час автономної роботи) або гостроспрямованих антен (що збільшує габарити пристрою), або їх комбінація.

Обладнання детектора двома наборами приймачів розширює його функціональні можливості: на один екран виводиться перехоплена першим приймачем відеотрансляція з FPV-дрона, а на другому здійснюється сканування частотного діапазону на предмет пошуку сигналів інших літальних апаратів (на інших частотах) з відображенням перебігу цього процесу на додатковому екрані (див. рис. 2, де наведено лише деякі приклади).



Рисунок 1 – Плата детектора (сканера) відеосигналу з FPV-дронів «Яструб»



а *б*

Рисунок 2 – Залежність прийнятої потужності відеосигналу від частоти: на сітці частот (*а*) й спектр у діапазоні частот (*б*)

Вбудований варіант сканера «Яструб» з двома приймачами на кожний діапазон застосовується у складі наземної станції керування дронами «Жирафа» (див. у цій же збірці тез доповідей). Оскільки увага оператора літального апарата прикута до монітора (окулярів), куди виводиться відеотечія, другий номер розрахунку може періодично поглядати на допоміжний екран. Якщо людина не впізнає місцевість на екрані, то вона натискає кнопку «Пропустити» й на екран буде виведено відео з наступної частоти. Якщо ж буде впізнано навколишній ландшафт на черговій частоті, то це означає, що у їхньому районі хтось літає…

УДК 629.735.072.8.08:681.3

Кіндрачук О. С.
студент, НУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

Максимович О. В.
д-р техн наук, керівник, професор, НУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

ЦИФРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ АЕРОПОРТУ ІВАНО-ФРАНКІВСЬК ДЛЯ АВІАЦІЙНОГО СИМУЛЯТОРА X-PLANE 12 У WORLDEDITOR 3D

Сучасна авіаційна індустрія вимагає максимально реалістичних інструментів для навчання та тренувань. Одним із найпопулярніших комп'ютерних симуляторів, що використовуються для тренувань та моделювання польотів, є X-Plane 12. Якість підготовки фахівців безпосередньо залежить від точності відтворення реальної аеродромної інфраструктури.

Метою цієї роботи є створення високодеталізованої моделі аеропорту Івано-Франківськ (UKLI) для симулятора X-Plane 12 у середовищі WorldEditor 3D (WED).

Робота включала створення 3D-моделей основних будівель, руліжних доріжок, перону, системи освітлення, а також навколишньої інфраструктури (рис. 1). Для моделювання об'єктів використовувалася програма SketchUp, яка дозволяє створювати точні геометричні форми, імпортувати текстури та експортувати моделі у форматі, сумісному з X-Plane.



Рисунок 1 – 3D-модель аеропорту Івано-Франківськ (UKLI)

Особливу увагу було приділено реалістичності моделей – будівлі терміналу, диспетчерської вежі, ангари та допоміжні споруди були відтворені на основі фото- та супутникових матеріалів. Це дозволило досягти високої деталізації, яка створює відчуття присутності на справжньому летовищі.

У процесі роботи було подолано певні технічні труднощі. Насамперед, нестача точної технічної документації, тому доводилося орієнтуватися на відкриті джерела, фото, відео та супутникові знімки. Це ускладнювало правильне масштабування об'єктів і визначення їхніх реальних пропорцій.

Виникали проблеми з узгодження текстур і освітлення. Для забезпечення візуальної природності в X-Plane 12, доводилося вручну підбирати матеріали, рівні блиску й тіні. Часто після експорту з SketchUp у WED виникали помилки у відображенні об'єктів, через що доводилося коригувати геометрію або перетекстуровувати моделі.

Виявилося, що X-Plane не підтримує занадто складні полігональні моделі, тому потрібно було оптимізовувати об'єкти без втрати якості візуалізації.

Виникали проблеми сумісності версій WED і симулятора, що впливало на коректне завантаження окремих об'єктів.

Незважаючи на ці проблеми, усі технічні виклики вдалося подолати завдяки практичним знанням, експериментам та тестуванню у самому симуляторі.

Створення моделі аеропорту Івано-Франківськ має потенціал для використання у навчанні курсантів військових авіаційних спеціальностей, що дозволяє їм без ризику освоювати складні елементи взаємодії з інфраструктурою летовища.

Робота над створенням тривимірної моделі аеропорту Івано-Франківськ у WorldEditor 3D є важливим внеском у розвиток навчальних і дослідницьких можливостей симуляторів. Вона поєднує технічну точність, інженерне мислення та творчий підхід, що відкриває нові перспективи для авіаційної освіти й підготовки фахівців майбутнього. Ця робота підтверджує можливість реалізації складних інженерних проектів на основі відкритих даних та сучасних інструментів моделювання, зокрема WED і SketchUp.

Список літератури

1. Architectural Design with SketchUp: The impact of flight simulation in aerospace. /Alexander Schreyer, D. J. Allerton, The Aeronautical Journal, 2010, 114.1162: 747-756.

2. X-Plane 12 Scenery Development Manual. Laminare Research, 2023. [Електронний ресурс] https://developer.x-plane.com/manuals/wed/

УДК 004.94:631.3

Артьомов А. І.
студент, Національний аерокосмічний університет (Харківський авіаційний інститут), м. Харків, Україна

Артьомов І. В.
старший викладач кафедри 105, Національний аерокосмічний університет (Харківський авіаційний інститут), м. Харків, Україна

ІТ ДЛЯ ПЛАНУВАННЯ МАРШРУТІВ РОБОТИЗОВАНИХ СИСТЕМ У АПК

Останні події показали, що майбутнє сільського господарства є ключовим для розвитку економіки та продовольчої безпеки. Актуальним є розроблення методології оцінки ефективності маршрутів роботизованих систем у сільському господарстві з урахуванням управління рухом наземних і повітряних аграрних роботів. Особливу увагу слід приділити критеріям ефективності та факторам, що впливають на роботу роботів: енергоспоживанню, рельєфу, погодним умовам і характеристикам ґрунту. Неефективне планування призводить до зниження продуктивності, перевитрати енергії, технічних збоїв і обмеження масштабованості. Це підкреслює необхідність створення сучасних інформаційних технологій для автономного, адаптивного та безпечного планування маршрутів у складних агротехнологічних умовах. **Мета дослідження** — розробити підходи до автоматизації планування маршрутів роботизованих аграрних систем із використанням алгоритмів оптимізації (генетичні, ройові, пошуку в просторі станів), нечіткої логіки та моделювання сценаріїв у цифрових двійниках полів, що забезпечує адаптивність маршрутів та мінімізацію витрат ресурсів. Результати агрегованих показників ефективності маршрутів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунків агрегованих показників ефективності для планування маршрутів

Значення показників ефективності (K_i)		Моделі планів маршрутів (n)		
		a	b	c
A (min)	A1 (min)	A1a1	A1b1	A1c1
	A2 (min)	A2 a2	A2b2	A2 c2
	An (max/min)	Anan	Anbn	Ancn
K_i (max/min)	K_n (max/min)	$K_n$an	$K_n$bn	$K_n$cn

Мінімальне значення відповідає оптимальному маршруту з найкращим балансом витрат, часу та точності руху.

Розрахунки сценаріїв маршрутів виконано за допомогою розробленого програмного комплексу (рис. 1), який забезпечує моделювання, аналіз та оптимізацію маршрутів з урахуванням параметрів, обмежень і умов експлуатації.

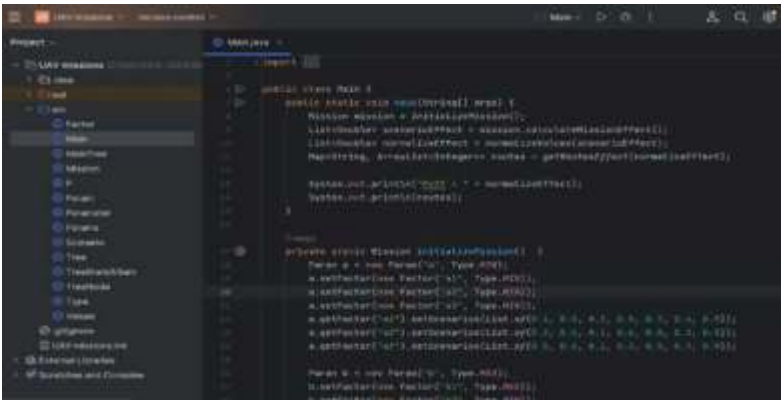


Рисунок 1 – Програма для розрахунку оптимальних маршрутів

Програмне рішення дозволяє здійснювати **комплексний аналіз маршрутів,** враховуючи особливості рельєфу, витрати енергії, швидкість виконання операцій та умови агротехнологічного процесу. Розроблена методика може бути інтегрована в **інформаційні системи управління агровиробництвом**, забезпечуючи адаптивне планування та підвищення загальної ефективності роботизованих комплексів у реальних польових умовах.

Список літератури

1. Alina Artomova and Ihor Artomov. Methodology for Assessing the Efficiency of Generated UAV Flight Route Plans for Optimal Selection // SIEMS-2025, LNNS 1480, P. 1–11, 2025. https://doi.org/10.1007/978-3-031-95191-6_22

2. Sopov, Y. O., Krytsky, D. M., Artomova, A. V., Artomov, I. V. Methodology for Constructing Trust-Based Routing in Swarm UAV Networks Based on Traffic Analysis and Anomaly Detection. Current State of Scientific Research and Technologies in Industry, 2025, No 2 (32), P. 133–142. https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.2.133

УДК 316.77:005.7]:629.7(477.64)

Лебедєва О. В.
аспірантка, Запорізький національний університет,
м. Запоріжжя, Україна
Цибуля Н. О.
аспірантка, Запорізький національний університет,
м. Запоріжжя, Україна

ФОРМУВАННЯКУЛЬТУРИ ВНУТРІШНІХ КОМУНІКАЦІЙ НА АВІАЦІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ: ВИКЛИКИ ГЕНДЕРНОЇ РІВНОСТІ ТА ТРАНСФОРМАЦІЯ ЕТИЧНИХ СТАНДАРТІВ

Внутрішні комунікації підприємств є інструментом управління персоналом і впливають на ефективність виробничих процесів. Формування культури відкритої та етичної комунікації, включно з гендерною рівністю, сприяє зниженню конфліктності, збереженню кадрового потенціалу – ключових передумов стабільності та інноваційного розвитку підприємства авіаційної галузі.

Аналіз наукових джерел підтверджує різноплановість підходів до організації внутрішніх комунікацій. Л. Щетініна підкреслює, що внутрішні комунікації пронизують усі процеси підприємства, підвищуючи продуктивність працівників, рівень інформованості та залученості, забезпечуючи оперативність постановки завдань і підтримуючи репутацію організації [5, с. 230–231].

Д. Олтаржевський акцентує, що в умовах кризи комунікації мають не лише інформувати, а й «згуртовувати колектив спільними цілями та цінностями», формуючи адаптивну систему масмедійної взаємодії [3, с. 82; 4, с. 80]. А. Лизанець наголошує на функції комунікацій як інтегруючого процесу кадрового потенціалу, що виступає інструментом реалізації кадрової політики [2, с. 129].

На прикладі АТ «Мотор Січ» розглянемо трансформацію етичних стандартів у корпоративних виданнях. Через контент-аналіз випусків газети «Мотор Січ» за 2015, 2020 та 2025 роки, присвячених Міжнародному жіночому дню, досліджено гендерний дискурс у внутрішніх комунікаціях підприємства. Опитування, проведене на АТ «Мотор Січ» (374 респонденти, листопад 2024 року), показало, що основними інформаційними каналами для робітників є корпоративна газета (52,9%) та обмін інформацією з колегами (50,8%) [1, с. 173]. Це доводить, що корпоративне видання залишається центральним інформаційним та культурним інструментом впливу, а також унікальним носієм ціннісних та етичних повідомлень.

У 2015 р. газета «Мотор Січ» виходила двічі на тиждень – у понеділок та четвер – у форматі восьми шпальт (А4). Протягом березня було опубліковано

три номери, приурочені до Міжнародного жіночого дня (№14 від 02.03.2015, №15 від 05.03.2015, №16 від 12.03.2015), які загалом містили 30 матеріалів, із яких 12 (40%) мали безпосередній або опосередкований зв'язок із тематикою свята. Ідеологічне спрямування та мовне оформлення матеріалів відображають характерні для середини 2010-х років соціальні уявлення про гендерні ролі. У текстах простежується акцент на побутовій та сімейній ролі жінки (зокрема, у контексті виховання дітей), а також на її зовнішності. У публікаціях активно відтворюються традиційні гендерні стереотипи, що фіксується як у тематичних висловлюваннях («Найкращий подарунок для жінки – це квіти», «Ви надихаєте нас, чоловіків…»), так і в мовних кліше на зразок слабка/прекрасна стать, любі жінки тощо. Показовим прикладом є матеріал «Топ-10 найкращих жіночих винаходів» (№15 від 05.03.2015), який, згідно з авторським задумом, мав би деконструювати стереотип про відсутність жінок у науці. Втім лінгвістичний аналіз тексту засвідчує наявність маркерів, що навпаки репродукують дихотомію «жінка – побут», «чоловік – наука», відтворюючи традиційну патріархальну модель гендерного поділу сфер діяльності.

У 2020 р. видання «Мотор Січ» виходило один раз на тиждень, щочетверга, у форматі восьми шпальт (А4). До 8 Березня було підготовлено два тематичні номери – №8 від 05.03.2020, №9 від 12.03.2020, де вміщено вісім публікацій, присвячених святу, серед яких переважає розважальний контент. Журналістський дискурс цього періоду все ще містить елементи гендерної стерео типізації: у текстах зберігаються традиційні мовні формули: «жіноча мудрість», «ідеальна дружина – красуня, господиня» тощо, що закріплюють патріархальні уявлення про побутово-емоційну функцію жінки.

У 2025 р. газета виходить один раз на тиждень (щочетверга) у форматі чотирьох шпальт (А3). У тематичному номері з нагоди 8 Березня (№ 8 від 6 березня 2025 р.) із 12 матеріалів 6 тематично пов'язані зі святом. Публікації мають переважно корпоративне спрямування: висвітлюють професійні здобутки працівниць, зокрема керівниці транспортного управління. У традиційному вітальному слові керівництва відсутні стереотипні вислови, натомість наголошується на професійному внеску жінок у виробничі процеси. Водночас у низці матеріалів простежуються елементи традиційного гендерного дискурсу, зокрема використання кліше: «8 Березня – свято весни та краси», «прекрасна стать», «сильна стать», «жінки – джерело натхнення» тощо.

Порівняльний аналіз матеріалів газети «Мотор Січ» за 2015, 2020 та 2025 рр. демонструє поступову трансформацію та еволюцію культури внутрішніх комунікацій підприємства у напрямі етичного оновлення та гендерної чутливості. Від риторики компліментарного патріархалізму видання поступово переходить до інклюзивної комунікаційної моделі, що засвідчує

вплив сучасних тенденцій гендерної рівності на корпоративну культуру. Водночас повна деконструкція традиційних стереотипів ще не відбулася.

Список літератури

1. Лебедєва О. Внутрішні комунікації підприємств: корпоративні медіа під час війни та їхня соціальна відповідальність / Лебедєва О. // Журналістика миру під час війни: потенціал і можливості : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. / відп. ред. В. А. Ковпак. – Запоріжжя : ЗНУ, факультет журналістики, 2024. – С. 173–178.

2. Лизанець А. Г. Внутрішні комунікації в системі управління персоналом організації / Лизанець А. Г., Феєр О. В., Бондарева М. С. // Економічний вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут». – 2022. – № 23. – С. 127–132.

3. Олтаржевський Д. Корпоративні комунікації в Україні в умовах війни з росією / Олтаржевський Д. // Scientific Notes of the Institute of Journalism. – 2022. – Т. 2. – С. 73–85.

4. Олтаржевський Д. О. Корпоративні медіа: теорія і практика : навч. Посіб / Олтаржевський Д. О. – К. : Центр вільної преси ; Рядбіна, 2012. – 60 с.

5. Внутрішньокорпоративні комунікації в цифровому середовищі / . Щетініна Л. В., Рудакова С. Г., Поплавська О. М. // Бізнесінформ. – 2023. – № 2. – С. 229–235.

УДК 004.89:621.438

Табунщик Г. В.
канд. техн. наук, професор, НУ «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна

Шитікова О. В.
канд. техн. наук, АТ «Мотор Січ»,
м. Запоріжжя, Україна

ФОРМУВАННЯ ЗВЕДЕНИХ ПРОТОКОЛІВ ВИПРОБУВАНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Автоматизація будь-якого рутинного процесу значно прискорює його виконання та підвищує точність. Повною мірою це стосується і процесу випробувань газотурбінних установок наземного використання (ГТУ НВ) в частині оформлення звітної документації. Всі змінні стани процесу випробувань ГТУ НВ містять дії по збереженню результатів роботи об'єкту випробувань [1]. При цьому накопичені данні, що часто є «сирими», необхідно належним чином обробити та структурувати для формування протоколів випробувань, звітів, зведених таблиць тощо. Промислове застосування штучного інтелекту, зокрема великих лінгвістичних моделей (Large Language Model – LLM), показує високі результати [2–3].

Метою представленої роботи є аналіз сучасних можливостей використання LLM для автоматизованої генерації звітної документації, зокрема протоколів випробувань, та оцінка їх впливу на ефективність процесу випробувань ГТУ НВ.

Зміст та формат протоколів випробувань визначається вимогами виробника та чинними стандартами, і є по суті формалізованими бланками з чіткою структурою, що дає можливість їх автоматизованій обробці.

Було досліджено можливості різних великих лінгвістичних моделей. Для отримання зведених протоколів випробувань, основаних на наборах результатів випробувань ГТУ НВ, наприклад, представлених поточними протоколами випробувань, запропоновано використання моделі LLAMA (Large Language Model Meta AI). Ця модель, що базується на архітектурі Transformer, розроблена для підвищення продуктивності у дослідницьких та практичних задачах обробки природної мови [2]. Також модель LLAMA може бути ефективно доналаштована (fine-tuned) для конкретної документації, наприклад зведених протоколів випробувань.

Серед обмежень застосування LLM можна зазначити потребу в великих обчислювальних ресурсах та питання пов'язані з тонким доналаштуванням моделі, що вимагає використання певної бази даних результатів випробувань, які відносяться до чутливої інформації з точки зору конфіденційності [3-4]. Рішенням цього може бути використання локальних LLM, що забезпечить

повний контроль над даними та гнучке налаштування. Наприклад, можна доналаштувати модель технічною документацією, звітами, протоколами випробувань без ризику витоку даних.

Використання LLM для генерації звітної документації дозволить скоротити час на її створення та зменшити помилки, що виникають через людський фактор.

Список літератури

1. Шитикова Е. В. Формализация процесса испытаний газотурбинных установок наземного применения / Шитикова Е. В., Табунщик Г. В. // Электротехнические и компьютерные системы. – 2015. – № 18(94). – С. 75–80. DOI: 10.15276/etks.18.94.2015.14.

2. M. Raza , Z. Jahangir , M.B. Riaz, M.J. Saeed, M.A. Sattar. Industrial applications of large language models. Scientific Reports. 2025. Vol.15:13755. – P. 1–23. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-025-98483-1.

3. Z. Chkirbene, R. Hamila, A. Gouissem, U. Devrim Large Language Models (LLM) in Industry: A Survey of Applications, Challenges, and Trends. 2024 IEEE Proceedings of the 21st International Conference on Smart Communities: Improving Quality of Life using AI, Robotics and IoT (HONET). – P. 229–234. DOI: 10.1109/HONET63146.2024.10822885.

4. S. Sriram, C. H. Karthikeya, K. P. Kishore Kumar, N. Vijayaraj, T. Murugan. Leveraging Local LLMs for Secure In-System Task Automation With Prompt-Based Agent Classification. IEEE Access. 2024. Vol.12. P.177038-177049. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3505298

УДК 005.021

Новіков М. А.
аспірант НУ «Запорізька Політехніка»

СТРАТЕГІЧНИЙ ФОРСАЙТИНГ- ІНСТРУМЕНТ ЕФЕКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ПІДПРИЄМСТВАМИ АВІАЦІЙНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Авіаційна промисловість є однією з найважливіших і найскладніших галузей світової економіки. Авіаційна промисловість характеризується високою капіталомісткістю та технологічною складністю, оскільки виробництво потребує значних інвестицій у наукові дослідження, розробки та спеціалізоване обладнання. Авіаційна промисловість належить до наукоємних секторів світової економіки, де велика частка витрат спрямовується на інновації, вдосконалення матеріалів, підвищення енергоефективності та безпеки. Авіаційна промисловість чутлива до економічних криз, цін на паливо та геополітичні ризики, адже попит безпосередньо залежить від стану світової економіки. На національному рівні авіаційна галузь має стратегічне значення для національної безпеки, тому активно підтримується державою.

Швидкі та непередбачувані зміни, геополітичні конфлікти, пандемії, науково-технічний прогрес, економічні кризи роблять процес управління в авіаційній промисловості надзвичайно складним. Економічна невизначеність стає новою нормою. Ефективне управління підприємством авіаційної промисловості в умовах невизначеності вимагає переходу від традиційного планування до адаптивних, гнучких та антикрихких стратегій. Ці стратегії повинні охоплювати всі ключові рівні управління: стратегічний, операційний та організаційний [1].

На стратегічному рівні управління орієнтується не лише на збереження життєздатності підприємства, а й використання змін зовнішнього середовища як джерела конкурентної переваги. В умовах високої невизначеності більш ефективними стають методи стратегічного форсайтингу та сценарне планування.

Стратегічний форсайтинг часто розглядають як інноваційний інструмент стратегічного мислення. Стратегічний форсайтинг – це системний процес передбачення та формування бажаної візії майбутнього, майбутніх тенденцій, викликів, можливостей з метою прийняття довгострокових стратегічних рішень. Основне завдання стратегічного форсайтингу активне формування бажаного майбутнього та розробка шляхів його досягнення через узгодженні дії різних елементів соціально-економічної системи. Процес стратегічного форсайтингу починається з формування бажаної візії майбутнього, рухається через аналіз сьогодення до прийняття заходів по досягненню бажаного майбутнього.

Стратегічний форсайтинг є інтегрованою методологією, яка поєднує елементи прогнозування, а також розробка практичних заходів для досягнення бажаних стратегічних цілей підприємства.

Методологічна основа форсайтингу включає різні методи або комбінацію кількох аналітичних інструментів – SWOT- аналіз, метод Дельфі, морфологічний аналіз, екстраполяцію, сценарне планування, експертні методи. Для підприємств авіаційної галузі форсайтинг використовується для виявлення довгострокових технологічних тенденцій, аналіз сильних і слабких сторін підприємства, аналіз змін регуляторної політики та формування дорожніх карт інноваційного розвитку.

Стратегічний форсайтингу може виконувати критично важливі для стратегічного управління авіаційним підприємством функції:

- формування стратегічного бачення майбутнього, управління ризиками та стійкість, сприяння інноваціям.

Для авіаційного підприємства основними напрямками стратегічного форсайтингу є:

- прогнозування тенденцій у сфері технологій, безпеки та екологічних стандартів;
- розроблення сценаріїв розвитку виробничої бази та продуктового портфеля;
- формування стратегічних рішень щодо інвестицій у науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи;
- підвищення адаптивності до змін ринку та регуляторних вимог.

Застосування форсайтингу підвищує ефективність управлінських рішень завдяки міждисциплінарній участі від інженерів до маркетологів і регуляторних експертів. У контексті авіаційної промисловості це може стосуватися адаптації до вимог «Стратегічного плану ICAO 2026-2050» [2].

Список літератури

1. Дунда С. П. Технологія форсайт як інструмент стратегічного менеджменту / Дунда С. П., Ковтун О. С.// Молодий вчений. 2017 №12(52). С.612-616

3. ICAO. Strategic plan 2026-2050 https://www.icao.int/about-icao/Counsil/strategic-plan-2026-2050

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»

27–28 листопада 2025 р.

Один електронний оптичний диск (DVD-ROM); супровідна документація. Тираж 100 прим. Зам. № 1086
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