

## ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора Ауліна Віктора Васильовича, професора кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного технічного університету на дисертаційну роботу Духоти Олександра Івановича на тему "Науково-технічні основи підвищення довговічності деталей авіаційних трибомеханічних систем за умов їх фретинг-контактної взаємодії", подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах.

**Актуальність теми.** При вирішенні загальнотехнічної проблеми зниження матеріалоемності, зменшення жорсткості конструкцій, зростання робочих навантажень та вимог до економічної ефективності використання машин одне із ключових місць належить забезпеченню високого рівня зносостійкості та терміну безвідмовного функціонування деталей і вузлів трибомеханічних систем. За різними оцінками від 60% до 90% несправностей і відмов у роботі машин і механізмів виникає унаслідок зносу і пов'язаних з ним руйнуванням деталей.

Серед трибомеханічних систем найбільш обмеженої довговічності в конструкції повітряних суден (ПС) і авіаційних двигунів (АД) виділяють трибосистеми малорухомих і номінально-нерухомих вузлів і з'єднань, деталі яких зазнають малих відносних вібраційних переміщень, тобто фретинг-процесів зношування, а в окиснювальному середовищі – фретинг-корозії. Фретинг-корозія є одним із найбільш руйнівних, важкопередбачуваних і небезпечних проявів поверхневого руйнування деталей та знаходиться в центрі уваги фахівців різних галузей машинобудування, залишаючись не в повній мірі вирішеною.

Ця проблема особливо актуальна у зв'язку із освоєнням випуску нових типів ПС і АД з більш високими тактико-технічними характеристиками і строками служби, при впровадженні нових технічних рішень та матеріалів, вирішенні завдань відновлення та подовження їх ресурсу. Існуючі методи поверхневого зміцнення і відновлення деталей, в багатьох випадках, вичерпали свої можливості

і не можуть задовольняти зростаючим вимогам забезпечення високого рівня експлуатаційної надійності трибомеханічних систем авіаційної техніки.

До того ж відсутнє достатньо повне розуміння механізмів керування процесами фретинг-корозії та фретинг-зношування, критеріїв та методів оцінювання та прогнозування працездатності таких систем. Підходи забезпечення зносостійкості деталей та їх спряжень, що базуються на загальних теоріях тертя та зношування, для умов фретинг-корозії не завжди дають позитивні результати. Тому, розробка науково обґрунтованих підходів забезпечення високого і прогнозованого рівня довговічності деталей шляхом формування функціональних поверхонь і матеріалів з необхідними керованими властивостями та методів оцінювання і прогнозування фретинг-корозійної сумісності та зносостійкості елементів авіаційних трибомеханічних систем є безумовно актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана згідно з планами науково-дослідної роботи Національного авіаційного університету та інших організацій, де здобувач був виконавцем та відповідальним виконавцем наступних держбюджетних тем: №386-ДБ07 (0107U002739); №718-ДБ11 (0111U01639); №947-ДБ14 (0114U001604); №008-ДБ92 (01930017660); №620ГА-95 (0195U0028595). Дисертаційні дослідження проводились також при виконанні науково-дослідних робіт за госпрозрахунковими договорами та договорами про науково-технічну співпрацю з ДП "Антонов", ДП "Завод 410 цивільної авіації", ДП "Конотопський авіаремонтний завод "Авіакон", ДП "Луцький авіаремонтний завод "Мотор" та за планами держбюджетних науково-дослідних робіт кафедри технологій виробництва та відновлення авіаційної техніки.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Розроблено аналітично-розрахунковий метод оцінювання зносостійкості поверхневих шарів деталей для умов фретинг-корозійного зношування, за яким можливий опис і аналіз зміни фізичного стану матеріалу поверхневого шару та визначення енергетичних умов його руйнування. Запропоновано розрахунково-аналітичний метод оцінювання фретинг-корозійної сумісності матеріалів та виявлення умов втрати працездатності, пов'язаної з накопиченням в зоні трибоконтaktu продуктів зношування. Встановлено закономірності та з'ясовано механізм трибологічних

процесів на основі поєднання фретингу з дією нормальних динамічних навантажень до поверхні контакту, що визначають зміну інтенсивності фретинг-корозійного зношування, враховуючи природу матеріалів трибоспряження, схеми контакту та параметри відносного зміщення поверхонь і фретингу. Встановлено закономірності та механізми впливу природи матеріалів та амплітудно-силових параметрів фретингу на статистичні характеристики розсіювання величини зносу. На основі енергетичної моделі трибопроцесів та структурно-реологічних механізмів дисипації енергії у трибологічному контакті, як теоретичної основи, розроблено загальну концепцію та принципи керування зносостійкістю динамічно-навантажених трибосистем для створення поверхневих структур та матеріалів з підвищеним опором фретинг-корозійному зношуванню. Використовуючи метод скінченно-елементного аналізу встановлено закономірності розподілу додаткових напружень, що виникають в системі "зносостійке покриття-металева основа" від дії температур фрикційного нагріву та визначені шляхи їх мінімізації.

**Загальна характеристика дисертаційної роботи.** Дисертація, яка представлена на розгляд, складається з анотації, вступу, шести розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації складає 402 сторінок. Обсяг анотації складає 30 сторінок. Дисертація містить 122 рисунки, 34 таблиці. Список використаних джерел складається із 355 найменувань, з них 314 кирилицею та 41 латиницею. Додаток містить 8 сторінок. Обсяг основної частини дисертації становить 284 сторінки.

**Вступ** містить основні дані щодо актуальності роботи, її наукової цінності і практичного значення. Визначено мету і задачі дисертаційної роботи, об'єкт та предмет дослідження, наведено особистий внесок здобувача при виконанні роботи.

**У першому розділі** наведено аналіз проблеми трибологічного забезпечення надійності авіаційних трибомеханічних систем. Дано структуру, основні функції та критерії їх надійності. Розглянуто основні процеси, що відбуваються в трибомеханічних системах. Показано, що нормальний режим роботи забезпечується різними видами мащення.

Зазначено взаємозв'язок технічних станів елементів трибосистем, їх

переходи у граничні стани. Показано, що поверхнєве руйнування деталей відбувається під дією сил тертя, корозійних процесів, електричної ерозії, дефектів хіміко-термічної обробки. Наявність силового впливу на поверхні деталей є відмінною ознакою, що відрізняє знос від корозії. Найбільш поширеним у авіаційних трибосистемах є безпосередньо фрикційно-контактна взаємодія поверхонь деталей під час відносного переміщення. Критерії їх граничного стану поділяються на технічний та економічний. Перший з них визначається зміною розмірів і геометричною формою деталей, втратою міцності, жорсткості, зміною умов тертя і зношування, механічними пошкодженнями робочої поверхні. У другому враховується збільшення питомих витрат на підтримування працездатності деталей, їх спряжень та агрегатів під час технічного обслуговування та внаслідок підвищених витрат паливно-мастильних матеріалів.

Наведені сучасні уявлення про природу фретинг зношування металів. В залежності від характеру взаємодії поверхонь деталей виділено п'ять основних фрикційних зв'язків: пружне та пластичне відтиснення матеріалу, мікрорізання, адгезійне руйнування і когезійний відрив. У підходах теорії пристосованості матеріалів деталей та втомного зношування і руйнування їх поверхневих шарів показано, що утворення вторинних структур не виключає можливості їх втомного руйнування. Розглянуті результати досліджень, які ґрунтуються на підходах термодинаміки незворотних процесів у відкритих системах на атомарному, нано- та мезоскопічному рівнях. Дано аналіз механізмів внутрішнього і зовнішнього тертя.

Розглянуто кількісний аналіз експлуатаційних дефектів деталей авіаційних трибомеханічних систем на основі дефектації деталей трибоспрями трьох типів літаків, трьох типів гелікоптерів і двох типів авіаційних газотурбінних двигунів. Частка пошкодження деталей фретинг-корозією становила відповідно: 64,1%; 51,2%; 87,8%. Це пояснюється тим, що фретинг-корозія розвивається переважно в номінально нерухомих і малорухомих вузлах і з'єднаннях, а також в умовах циклічних і вібраційних навантажень. Запропоновано дефекти спричинені фретинг-корозією поділяти на дефекти фретинг-зносу і фретинг-втоми. Наведено аналіз стану досліджень з проблематики зношування деталей при фретинг-корозії. Виділено три основні стадії розвитку фретинг-корозії. Виявлено, що не існує



чіткого обґрунтування нижньої і верхньої амплітудних меж фретинг-корозії. Розглянуто вплив частоти коливань та температурного фактору на розвиток фретинг-корозії при зміні тривалості окислювальних і корозійних процесів на поверхню металу. Проведено огляд конструктивно-технологічних заходів боротьби з фретинг-корозією та прогресивних методів інженерії зносостійких поверхонь деталей. Показано, що пошук ефективних заходів підвищення фретингової довгостійкості, можливо проводити за конструктивними методами, підбиранням найбільш сприйнятливого поєднання матеріалів, застосуванням ефективних мастильних матеріалів і способів мащення, а також технологічними методами шляхом зміцнення, поверхневого модифікування та нанесення захисних покриттів.

**У другому розділі** наведено основні методи і методики експериментальних досліджень процесів фретинг-корозії. Представлено характеристику устаткування випробувань на зношування при фретинг-корозії (машина тертя МФК-1, вібраційний трибометр ИМФ) та відповідну методику; експериментальну установку для випробування на зношування при динамічному контактному навантаженні та методику досліджень; установку МУИ-6000 для випробування зразків на втому.

Дано металофізичні методи дослідження структурних перетворень, зміни хімічного складу і властивостей поверхневого шару у зоні фрикційного контакту, топографії поверхонь тертя та втомних зламів, а також впливу способів і технологій формування поверхнево модифікованих шарів і захисних покриттів. Підібране відповідне обладнання, а саме: оптичні мікроскопи МИМ-8 та Neophot-30, мікротвердомір ПТМ-3, оптичний бікулярний мікроскоп МБС-9, лазерний 3-D мікроскоп-профілограф, електронні мікроскопи з мікроаналізатором РЕМ-200, Cam Scan-4DV, JAMP-10S. Використані методи рентгеноструктурного аналізу та ОЖЕ-спектроскопія. Для виконання аналізу закономірностей зношуванню і керування технологічними процесами формування зносостійких покриттів використовується багатфакторний метод математичного планування експерименту.

**У третьому розділі** наведено результати досліджень закономірностей фретинг-корозійного зношування металів, встановлення фретинг-корозійної

сумісності матеріалів трибоспряжень. Для виявлення впливу природи матеріалів контактної пари на фрикційно-зносні характеристики проведені порівняльні випробування на зношування при фретинг-корозії титанового сплаву ВТ8, з використанням контртіла з різних матеріалів: сплав ВТ8, бронзе БрАЖ9-4, алюмінієвий сплав Д16Т, сталь 45, сталь 12 Х18Н10Т, магнієвий сплав МЛ5. Побудовані діаграми об'ємного зносу зразків, контрзразків та сумарного зносу в умовах фретинг-корозії та наведені топографії поверхонь доріжок тертя зразків і відсотковий вміст хімічних елементів на мікроділянці поверхні тертя, встановлена залежність коефіцієнту тертя від кількості циклів фретингу. Представлені результати дають можливість встановити сприятливе поєднання матеріалів у трибоспряженні з врахуванням взаємного їх впливу на фрикційно-зносні характеристики. Використано величину параметра  $\Delta$  як характеристику трибосистеми і як критерій визначення максимальної сумісності матеріалів трибоспряження ( $\Delta \rightarrow 1$ ). Виявлено вплив природи матеріалів і амплітудно-параметрів фретингу на величину і статистичні характеристики фретинг-зносу та вплив геометрії контакту елементів трибоспряження на фретинг-корозійне зношування. Досліджено механічні властивості спряження "титановий сплав ВТ8-алюмінієвий Д16Т". Представлено електронно-мікроскопічне зображення доріжки тертя зразків та результати мікрорентгено-спектрального аналізу відсоткового вмісту хімічних елементів, залежності приведених питомого і об'ємного зносу від амплітуди фретингу. Розглянуто процеси фрикційно-контактної взаємодії зношування матеріалів трибомеханічних систем в умовах динамічного і ударно-динамічного фретингу.

З'ясовано, що удар вносить суттєвий внесок в розвиток процесів зношування, а інтенсивність зношування залежить від природи і властивостей матеріалу. Визначено, що інтерметалід TiNi дає можливість реалізувати ефективно погашення коливань і релаксації напружень під час реалізації низькотемпературного мартенситного перетворення. Дано загальну концепцію та сформульовано структурно-реологічні принципи створення поверхнево-модифікованих шарів і захисних покриттів підвищеної фретингостійкості. Показано, що процес адгезійно-зсувної дисипації можна моделювати поведінкою реологічного тіла Фойгта під навантаженням і за умов дії циклічних зсувних

зусиль. На підставі енергетичної моделі трибосистеми та уявлень про структурно-реологічні механізми дисипації енергії у трибоконтакті сформульовано наступні принципи створення поверхнево-модифікованих шарів і захисних покриттів підвищеної фретинго-стійкості: мінімалізація підведеної механічної енергії; застосування матеріалів з високою дисипативно-релаксаційною здатністю; оптимальне поєднання релаксаційної здатності і критичної енергії руйнування матеріалів; оптимізація напружено-деформованого стану фрикційного контакту композиційних структур; створення термодинамічно-нерівноважних метастабільних структур.

У четвертому розділі досліджено вплив способу і технології формування дисипативних поверхнево-модифікованих шарів і захисних покриттів на фретингостійкість трибосистем. Розглянуто вплив технологічних параметрів формування і параметрів фретингу на процеси фретингостійкості трибосистем з дискретно-текстурованими олив'яними поверхнями. Використано метод багатофакторного математичного планування експерименту з побудовою моделей для вагового зносу. Розвиток фретинг процесів подано у вигляді тристадійної фізичної моделі. Досліджено фретингостійкість поверхнево-модифікованих шарів сформованих електроіскровим легуванням. Обґрунтовано вибір матеріалів та технологічних схем. Наведено результати дослідження закономірностей фретинг-корозійного зношування композиційних одно- та багатошарових електроіскрових покриттів на основі тугоплавких сполук. Виявлено глобулярний характер покриттів сформованих при електроіскровому легування електродними матеріалами та здійснено спробу пояснити механізм формування структурно-неоднорідних глобулярних покриттів. Наведено порівняльні результати зношеної здатності покриттів відповідно до загартованої сталі 45. Підвищену зносостійкість покриттів пов'язують з утворенням оксидних фаз в процесі їх формування. Досліджені на абразивну зносостійкість комбіновані покриття на основі композиційної кераміки, які мають більш високу стійкість до фретинг-корозійного зношування. Для виявлення впливу лазерної обробки досліджено структурно-фазовий склад поверхні покриття. Показано, що під час лазерного оплавлення відбувається трансформація співвідношення фаз. Розглянуто вплив матеріалів і технологій формування покриттів на їх фретингостійкість для

газотермічного та детонаційно-газового напилень, плазмового газовополуменевого і електродугового напилення. Наведені порівняльні результати зносостійкості в умовах фретинг-корозії покриттів та залежності коефіцієнтів тертя від кількості циклів фретингу, а також топографії поверхонь тертя зразків та контрзразків і відсотковий вміст хімічних елементів. Здійснене чисельне моделювання напружено-деформованого стану системи "покриття-основа" та побудовано розподіл еквівалентних напружень при різній температурі на поверхні.

**П'ятий розділ** присвячено розробці наукових принципів створення високотемпературних зносостійких матеріалів трибоспряжень деталей гарячої частини газотурбінного двигуна. Побудована еволюційна модель трибосистеми та сформульовано загальні принципи забезпечення зносостійкості матеріалів в умовах високотемпературного фретингу, а саме: принцип адаптації і саморегулювання структури; принцип мінімальності зовнішнього тертя і максимальної власної зносостійкості вторинних оксидних структур; принцип їх стійкості до крихкого руйнування; принцип мінімалізації напружень в системі "метал-оксид"; принцип температурної рівномірності і релаксаційної здатності матеріалу основи; принцип структурної стабільності. Дано теоретичне обґрунтування вибору складу компонентів, способу формування структури високотемпературних зносостійких матеріалів та термодинамічний аналіз композиційних евтектичних і порошкових матрично-наповнених сплавів систем на основі Co і Ni з вмістом Cr, Al, Fe та TiC, а також впливу їх структурно-фазового складу та температури на зносостійкість в умовах фретингу.

**У шостому розділі** побудована математична модель прогнозування фретингостійкості поверхневих шарів та розроблені практичні заходи підвищення довговічності деталей авіаційних трибомеханічних систем. Прогнозування проводилось на основі енергетичної моделі фретинг процесу з використанням рівняння Гіббса для зміни внутрішньої енергії системи. Показано, що перспективним напрямом для забезпечення високих трибологічних властивостей і несучої здатності є створення покриттів з градієнтними властивостями та дискретною структурою. В ході випробувань реєструється і контролюється зміна моменту тертя, будується графік залежності коефіцієнту тертя від кількості циклів



фретингу. Визначається максимальне значення коефіцієнта тертя на стадії припрацювання та її тривалість. Розглянуто методи підвищення контактної міцності і зносостійкості робочих поверхонь кульково-гвинтових механізмів. Пропонується технологія формування шару, який включає попереднє азотування з наступною дискретною лазерною обробкою в режимі поверхневого гартування. Підвищити довговічність деталей із високоміцних титанових сплавів пропонується методом комбінованої термічної та термодифузійної обробки, а підвищення втомно-циклічної міцності деталей нанесенням газотермічних покриттів. Розроблені технологічні рекомендації відновлення зношених деталей з титанових сплавів.

**У висновках** з 11 пунктів викладено найбільш важливі наукові і практичні результати, одержані в дисертаційній роботі.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність і новизна**

Достовірність отриманих результатів та висновків підтвержені порівнянням результатів теоретичних розрахунків з отриманими експериментальними даними. Висунуті у дисертації наукові положення та отримані висновки і рекомендації у достатній мірі обґрунтовані. Автором застосовані сучасні методи та методики досліджень фретинг-контактної корозії і обробки отриманих даних. Випробування авіаційних трибомеханічних систем виконувались на основі теорії моделювання та математичного планування експерименту. Теоретичні дослідження виконані на підставі фундаментальних положень трибології, термодинамічної теорії прогнозування та руйнування твердих тіл, зносостійкості трибосистем, структурно-енергетичної пристосованості матеріалів, положень трибохімії і реології твердої поверхні та мастильного шару.

**До найвагоміших науково-практичних результатів, отриманих в роботі, слід віднести** теоретичні і експериментальні результати, які дозволяють на основі встановлених закономірностей і принципів керування зносостійкістю, розробляти та впроваджувати конструктивно-технологічні заходи підвищення довговічності деталей та вузлів авіаційних трибомеханічних систем, що піддаються фретинг-корозійному зношуванню.

В роботі запропоновано аналітично-розрахунковий метод оцінювання фретинг-корозійної сумісності матеріалів контактних пар, розроблено концептуальний підхід до створення трибологічно ефективних технологій формування фретингостійких поверхонь.

Результати дисертаційної роботи використані при розробці технологічних рекомендацій по відновленню і підвищенню зносостійкості контактних поверхонь робочих лопаток турбіни газотурбінних двигунів, рейок механізму крила літаків, а також сприяли впровадженню сучасних вискоефективних технологій інженерії поверхні та матеріалів триботехнічного призначення для вирішення практичних завдань підвищення довговічності об'єктів авіаційного транспорту.

Розроблені функціональні матеріали та способи формування зносостійких поверхонь та дано технологічні рекомендації по підвищенню експлуатаційних властивостей і довговічності деталей авіаційних трибомеханічних систем.

**Повнота викладення основних результатів дисертаційної роботи у опублікованих наукових роботах.**

За темою дисертаційної роботи опубліковано 56 наукових праць, з них 1 монографія, 1 колективна монографія, 32 у фахових виданнях переліку МОН України з них 8 у виданнях що входять до міжнародних науково-метричних баз, 14 матеріалів та тез конференцій, 1 авторське свідоцтво та 7 патентів на винахід. Всі вимоги положень ДАК МОН України щодо наукових публікацій витримано. Зміст автореферату достатньо повно відображує зміст і результати дисертаційної роботи та не містить в собі результати кандидатської дисертації автора.

**Зауваження по дисертаційній роботі, автореферату та їх оформленню.**

1. Перший розділ дисертації перевантажено інформацією, яку бажано було б структурувати і подати більш стисло у вигляді блок-схеми, узагальнених таблиць або графіків.

2. Слід було у другому розділі чітко сформулювати методологію розв'язання досліджуваної проблеми із зазначенням концепції, підходів та методів дослідження процесів фретинг-корозії, вибору складу компонентів та способу формування структури високотемпературних зносостійких матеріалів.

3. Необхідно було обґрунтувати вибір матеріалів для дослідження на фретинг-корозію та методів і технологічних параметрів нанесення покриттів

методом комбінованої обробки, а саме електроіскровим легуванням з наступним лазерним оплавленням, покриттів сформованих газотермічним та детонаційно газовим напиленням, навести методику моделювання напружено-деформованого стану "покриття-основа".

4. Результати, представлені на рисунку 3.4, потребують пояснення, за рахунок яких процесів зменшується коефіцієнт тертя при фретинг-корозії.

5. Не зрозуміло, як на основі енергетичної моделі трибосистеми, формула (3.6), сформульовані принципи створення поверхнево-модифікованих шарів і захисних покриттів підвищеної фретингостійкості та побудований алгоритм їх створення (рисунок 3.20).

6. Згідно таблиці 4.3 використовується математичне планування експерименту, але не наведена база даних і не зрозуміло чим обумовлена ускладненість математичних моделей (4.1), (4.2), (4.3) при їх представленні в формі для розрахунків.

7. В таблиці 4.4 наведені дані мають велику похибку, наприклад для оцінки процесу масопереносу і товщини модифікованого шару покриття.

8. Реалізація схеми формування багат шарового покриття (рисунок 4.6) складна технологічно та потребує техніко-економічної оцінки.

9. При дослідженні різних типів покриттів використано методи Оже-спектроскопії, але не наведені Оже-спектри.

10. Залежності, представлені на рисунках 4.21 і 4.22, побудовані за трьома точками. Чи адекватно вони відображають залежності зносостійкості і температури зразків в зоні контактів від питомого навантаження і частоти коливань?

11. Висока фретингостійкість комбінованих покриттів сформованих електроіскровим легуванням і лазерною обробкою не викликає сумніву, але необхідно було навести технологічні режими цих обробок і обладнання на якому вони реалізовані.

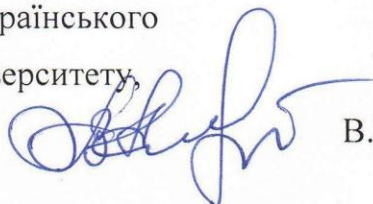
12. В пункті 6.1 мова йде про прогнозування фретингостійкості поверхневих шарів металів на основі енергетичної моделі фретинг процесу, але сама процедура прогнозування не відображена.

**Загальний висновок.** Дисертаційна робота Духоти Олександра Івановича на тему "Науково-технічні основи підвищення довговічності деталей авіаційних трибомеханічних систем за умов їх фретинг-контактної взаємодії" є закінченою науково-дослідною роботою, в якій отримані нові, науково-обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, які вносять вагомий внесок в розвиток науки про тертя та зношування та розкривають завдання вирішення важливої науково-прикладної проблеми підвищення довговічності деталей авіаційних трибомеханічних систем за умов їх фретинг-контактної взаємодії.

Напрямок проведеного дослідження відповідає паспорту спеціальності 05.02.04 – тертя та зношування в машинах. Викладене дозволяє стверджувати, що дисертаційна робота Духоти О.І. за представленими теоретичними і практичними результатами є актуальною, відповідає вимогам, що висуваються до докторських дисертацій згідно з пп. 9,10,12 "Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника", затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, а її автор Духота Олександр Іванович заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри експлуатації та  
ремонту машин Центральноукраїнського  
національного технічного університету,  
м. Кропивницький



В.В. Аулін

Підпис офіційного опонента, проф. Ауліна В.В. засвідчую

Перший проректор



В.М. Кропівний