

ЗАТВЕРДЖУЮ

Президент Національного університету
«Київський авіаційний інститут»



Ксенія СЕМЕНОВА

“ 03 ” / 06 2026 року

ВИСНОВОК

**Національного університету «Київський авіаційний інститут» (далі – КАІ)
про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів
дисертації Костецького Івана Володимировича на тему “Триботехнічні
властивості модифікованих лазерною обробкою евтектичних плазмових
покриттів”, поданої на здобуття ступеня доктора філософії
за спеціальністю 131 “Прикладна механіка”**

Витяг

із протоколу № 9 розширеного засідання
кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів КАІ
від 20 травня 2026 року

**Присутні на засіданні науково-педагогічні працівники кафедри
прикладної механіки та інженерії матеріалів:**

Носко П.Л.; д.т.н., професор, професор кафедри прикладної механіки та
інженерії матеріалів,

Мікосянчик О.О., д.т.н., професор, завідувач кафедри прикладної механіки та
інженерії матеріалів;

Кіндрачук М.В., д.т.н., проф., професор кафедри;

Мельник В.Б., к.т.н., доцент, доцент кафедри;

Богдан С.Ю., к.т.н., доцент, доцент кафедри;

Башта О.В., к.т.н., доцент, доцент кафедри;

Корнієнко А.О., к.т.н., с.н.с., доцент кафедри;

Повгородній В.О., к.т.н., доцент, доцент кафедри;

Шевченко О.А., к.т.н., доцент, доцент кафедри;

**Присутні на засіданні науково-педагогічні працівники інших кафедр
КАІ:**

Балалаєва К.В., д.т.н., професор, професор кафедри електричної інженерії та
енергомашинобудування;

Мнацканов Р.Г., д.т.н., професор, професор кафедри авіаційного транспорту;

Сидоренко О.Ю., к.т.н., доцент, заступник декана Аерокосмічного
факультету;

Токарук В.В., к.т.н., доцент кафедри авіаційного транспорту;
Харченко О.В. к.т.н., доцент, доцент кафедри авіаційного транспорту;
Хімко А.М., к.т.н., доцент, доцент кафедри авіаційного транспорту;
Якобчук О.Є., к.т.н., доцент кафедри авіаційної інженерії.

Присутні на засіданні науково-педагогічні працівники з інших установ:

Стебелецька Н.М., к.т.н., доцент, доцент кафедри прикладної механіки та технічного сервісу ВП НУБіП України "Бережанський агротехнічний інститут".

Серед присутніх 5 докторів технічних наук і 12 кандидатів технічних наук.

Порядок денний:

Обговорення дисертаційного дослідження аспіранта кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів КАІ Костецького Івана Володимировича на тему "Триботехнічні властивості модифікованих лазерною обробкою евтектичних плазмових покриттів", поданої на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 13 "Механічна інженерія" за спеціальністю 131 "Прикладна механіка".

Науковий керівник – член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, Кіндрачук Мирослав Васильович.

Дисертація виконувалася на кафедрі прикладної механіки та інженерії матеріалів Аерокосмічного факультету КАІ. Тема дисертації затверджена на засіданні Вченої ради Аерокосмічного факультету КАІ (протокол № 3 від 15 березня 2023 року).

Виступили:

У доповіді здобувач обґрунтував актуальність роботи, яка полягає у вирішенні важливої науково-технічної проблеми – підвищення ресурсу та надійності високонавантажених вузлів тертя сучасної авіаційної та транспортної техніки, що працюють в умовах адгезійного, абразивного, контактено-втомного, фретинг- та корозійно-механічного зношування. Доповідач зазначив, що об'єктом дослідження є процеси формування структури, напружено-деформованого стану та зношування евтектичних плазмових покриттів при лазерній модифікації. Для порівняння різних механізмів зміцнення було вибрано дві системи: самофлюсуючий нікелевий сплав Ni–Cr–B–Si (як еталон пластичності та корозійної стійкості) та залізохромистий сплав Fe–Cr–C–B типу Сормайт (як ефективна альтернатива нікелевим сплавам для формування великої кількості зміцнюючих фаз та метастабільного аустеніту). Нанесення покриттів товщиною від 0,3 до 1,5 мм здійснювалося мікроплазмотроном МП-04 на конструкційні основи: сталь 45 та авіаційний титановий сплав ВТ6. Здобувач детально зупинився на запропонованій двоетапній схемі лазерної обробки в аргонних середовищах.

Перший етап – оплавлення розфокусованою плямою великого діаметра (4–6 мм) при низькій швидкості, що забезпечує усунення типової для плазмового напилення дефектної ламелярної структури, пор та мікротріщин. Після першого етапу зафіксовано перехід до дендритно-евтектичної структури.

Другий етап – високошвидкісна обробка сфокусованим променем (діаметр плями 1–3 мм) за сітчасто-стілєниковою схемою. Цей етап дозволяє остаточно

усунути хімічну мікронеоднорідність, подрібнити структурні елементи та сформувати завершальну нанодисперсну структуру.

Експериментально доведено формування регулярної дискретної «бар'єрної архітектури» поверхні, що складається з оплавлених комірок та міжкоміркових ділянок. У зоні контакту з титановою основою ВТ6 зафіксовано утворення тонкого інтерметалідного прошарку на основі боридів та нікелідів титану, що забезпечує надійний металургійний зв'язок. Особливу увагу у доповіді було приділено аналізу напружено-деформованого стану. Здобувач продемонстрував, що застосування сітчасто-стільникового оплавлення дозволило ліквідувати небезпечні розтягувальні напруження (до +330 МПа), які виникали в покриттях на титані після першого етапу через різницю коефіцієнтів термічного розширення, та трансформувати їх у корисні залишкові стискальні напруження (до -150...-225 МПа).

За допомогою повного факторного експерименту типу 2^3 розроблено математичні моделі та проведено багатокритеріальну оптимізацію режимів лазерної обробки. Визначено оптимальне технологічне вікно: потужність лазера 1100–1200 Вт, швидкість сканування 14–15 мм/с. Інтегральна оцінка за допомогою радар-діаграм показала, що лідером за збалансованістю триботехнічних властивостей є система Fe–Cr–C–B/ ВТ6. Практична цінність дисертації підтверджується успішним впровадженням результатів досліджень у виробничий процес ДП «АНТОНІВ» для підвищення експлуатаційної надійності деталей авіаційної техніки.

У виступі було відзначено практичне значення роботи: отримано 2 патенти України, публікації у фахових виданнях, акти впровадження в АТ «АНТОНОВ» та інтеграцію результатів у навчальний процес КАІ.

Після закінчення презентації Костецькому І.В. присутніми на захисті фахівцями були поставлені наступні запитання:

Запитання до здобувача:

1. **Мнацаканов Р.Г.**, д.т.н., професор, професор кафедри авіаційного транспорту КАІ.

Запитання: За якими параметрами визначається завершення процесу припрацювання?

Відповідь: Дякую за запитання. Завершення процесу припрацювання визначається за переходом трибосистеми у режим динамічної рівноваги, що фіксується за одночасною стабілізацією чотирьох взаємопов'язаних параметрів. Першим критерієм є стрімке зниження інтенсивності зношування в 1,5–2 рази та її вихід на постійний мінімальний рівень, що свідчить про завершення згладжування мікрорельєфу та викришування крихких фаз. **Іншим** показником є припинення зростання мікротвердості поверхневого шару від деформаційного наклепу, що вказує на досягнення граничної структурної адаптації матеріалу. Третім параметром виступає стабілізація коефіцієнта тертя. Заключним критерієм є залишкове формування на поверхні контакту стійкої захисної вторинної структури у вигляді оксидних трибоплівок, які захищають основу від адгезійного руйнування та переводять систему в режим нормального окисного зношування.

Запитання: Це пара кочення чи пара ковзання?

Відповідь: Дякую за запитання. При випробуванні за схемою «ролик-ролик» на машині СМЦ-2 реалізується пара кочення з проковзуванням (комбіноване тертя кочення та ковзання). Така схема моделює реальні умови роботи високонавантажених трибоспрямих (зубчастих передач авіаційної техніки, кулачкових механізмів або підшипників кочення), де чисте ковзання чи чисте кочення майже не зустрічаються, а руйнування поверхонь відбувається переважно за механізмом контактної втоми (піттингу).

Запитання: Ви пов'язуєте довговічність покриттів із розвитком контактної втоми. Підкажіть, будь ласка, чи будувалися у вашій роботі криві розподілу втомної довговічності Вейбулла для оцінки ймовірності безвідмовної роботи досліджуваних матеріалів?

Відповідь. Дякую за запитання. Ні, статистичні криві розподілу Вейбулла в межах цієї роботи не будувалися. Оцінка контактно-втомної довговічності модифікованих покриттів проводилася детермінованим шляхом на основі порівняльних лабораторних випробувань за схемою "ролик-ролик" на машині СМЦ-2. Критерієм оцінки виступала фіксація моменту появи перших втомних тріщин та викришування матеріалу залежно від кількості циклів навантаження за фіксованих контактних напружень, а також металографічний аналіз глибини залягання та кінетики гальмування цих тріщин дискретною лазерною сіткою.

Запитання: Які саме числові значення параметрів контактної довговічності було набуто? При яких критичних навантаженнях та якій кількості циклів нагруження крива контактної втоми виходить на горизонтальну асимптоту, що свідчить про досягнення межі втомної міцності покриттів?

Відповідь. Дякую за запитання. Випробування покриттів на контактну втому проводилися на максимальній базі навантаження $N = 2 \cdot 10^6$ циклів. Вихід кривих на умовну горизонтальну лінію (границю втомної міцності), коли руйнування та піттинг практично припиняються, фіксується на рівні: для лазерно-модифікованої системи Fe–Cr–C–B - при контактних напруженнях 2200 МПа; для системи Ni–Cr–B–Si - при контактних напруженнях 1800 МПа. Дискретна лазерна сітка (діаметр плями 2,5 мм) створює стискальні залишкові напруження до -225 МПа, що блокує розвиток мікротріщин на цих режимах і забезпечує стабільність покриттів на базі випробувань.

Запитання: У вашій доповіді часто використовують термін "градієнтна структура". Уточніть, будь ласка, що саме мається на увазі під цим поняттям у контексті лазерної модифікації евтектичних покриттів?

Відповідь. Дякую за запитання. У контексті дисертаційного дослідження під "градієнтною структурою" мається на увазі особливий тип архітектури зміцненого поверхневого шару, в якому її мікроструктурні характеристики, фазовий склад, мікротвердість та залишкові напруження плавно і безперервно змінюються за глибиною – від екстремальних значень на самій поверхні до вихідних показників конструкційної основи.

2. Корнієнко А.О., с.н.с., доцент, доцент кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів КАІ.

Запитання: Яке обладнання використовували при лазерній обробці?

Відповідь. Дякую за запитання. Лазерна обробка зразків здійснювалася на базі технологічного комплексу "ЛАТУС-31" із коаксіальною подачею захисного газу аргону

Запитання: Уточніть геометричні параметри дискретної обробки. Який відсотковий рівень площинної дискретності було реалізовано за сітчасто-стілєнковою схемою? Також вкажіть, яка кількість експериментальних вимірювань виконувалася для отримання достовірних триботехнічних значень?

Відповідь. Дякую за запитання. При діаметрі лазерної плями 2,5 мм та кроці дискретної сітки 4,5 мм, коефіцієнт площинної дискретності становить близько 25–30%. При дослідженні кінетики зношування та мікротвердості кількість вимірювань у кожній експериментальній точці становила не менше 3–5 дублювань для кожної партії зразків, що дозволило забезпечити високу статистичну достовірність результатів із довірчою ймовірністю 0,95. При побудові моделей оптимізації досліджувалося 8 базових технологічних режимів із відповідною кількістю паралельних дослідів.

3. Носко П.Л., д.т.н., проф., професор кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів КАІ.

Запитання: Чи є запропонована двоетапна лазерна модифікація універсальною для всіх видів зношування (зокрема абразивного, адгезійного та корозійно-механічного)? Наскільки суттєво технологічний етап лазерної обробки підвищує собівартість готового виробу і в яких саме вузлах тертя авіаційної та транспортної техніки доцільно практично застосовувати ці покриття?

Відповідь. Дякую за запитання. Запропонована двоетапна лазерна модифікація не є абсолютно універсальною для всіх без винятку умов, проте вона демонструє максимальну ефективність та забезпечує зростання експлуатаційного ресурсу у 4–6 разів у чітко визначених режимах, а саме при адгезійному, абразивному та контактному-втомному зношуванні. У той же час, її застосування є обмеженим в умовах агресивного корозійно-механічного зношування через специфіку фазового складу евтектик та ризик розвитку локальної корозії на межах дискретних зон. З точки зору економіки, впровадження додаткового технологічного етапу лазерної обробки підвищує початкову собівартість виготовлення або відновлення деталі, проте це здорожчання повністю нівелюється вже на перших етапах експлуатації техніки, оскільки економічний ефект досягається за рахунок кратного збільшення міжремонтного ресурсу вузлів. Практичне застосування розробленої технології є найбільш доцільним і вже успішно підтверджено впровадженням у виробничий процес АТ "АНТОНОВ" для таких високонавантажених вузлів тертя авіаційної та транспортної техніки, як елементи злітно-посадкового шасі літаків (осі, втулки та напрямні стійок), та високонавантажені елементи трансмісій, включаючи шліцеві вали, кулачкові механізми та плунжерні пари паливних насосів.

Запитання. Що таке математична модель?

Відповідь. Дякую за запитання. Математична модель – це експериментально-аналітичний опис триботехнічної системи у вигляді математичних рівнянь (рівнянь регресії), які встановлюють чіткий кількісний

зв'язок між вхідними технологічними факторами та вихідними експлуатаційними характеристиками покриттів.

Запитання: Уточніть топологічні параметри другого етапу лазерного модифікування. З яким саме кроком виконувалося нанесення дискретних лазерних доріжок і які геометричні розміри сформованої стільникової комірки є оптимальними для блокування магістральних тріщин?

Відповідь. Дякую за запитання. Оптимальним є крок нанесення лазерних доріжок $S = 4,5$ мм при діаметрі лазерної плями $d = 2,5$ мм. За таких умов чистий лінійний розмір внутрішньої матричної комірки (неоплавленої зони між осями сусідніх доріжок) становить 2,0 мм. Цей розмір комірки є критично важливим, оскільки він менший, ніж критична тривалість розкриття втомних тріщин, що змушує тріщину впиратися у високотвердий бар'єр лазерної доріжки та зупиняти свій розвиток.

4. Мельник В.Б., к.т.н., доц., доцент кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів КАІ.

Запитання: Яким чином і за допомогою яких конструктивних чи кінематичних можливостей випробувального стенду СМЦ-2 вам вдалося згенерувати та стабільно утримувати екстремальні контактні напруження понад 2200 МПа у процесі дослідження триботехнічних властивостей покриттів?

Відповідь. Дякую за запитання. Екстремальні контактні напруження понад 2200 МПа на машині СМЦ-2 були здобуті завдяки геометрії схеми «ролик-ролик», де прикладене важільним механізмом високе радіальне зусилля (до 5000 Н) фокусувалося на мінімальній площі лінійного контакту зразків. Динамічне утримання такого навантаження без руйнування роликів стало можливим лише завдяки унікальній несучій здатності та високій мікротвердості (1020 HV) сформованого лазером градієнтного покриття.

Запитання: Уточніть, за якими саме критеріями фіксувався момент завершення випробувань зразків на контактну втому на машині СМЦ-2? Що слугувало сигналом для зупинки експерименту – досягнення певної базової кількості циклів навантаження чи поява перших ознак утомного викришування на поверхні кочення?

Відповідь. Дякую за запитання. Момент завершення випробувань фіксувався за двома критеріями: появою перших ознак втомного викришування (каверн піттингу площею понад 1–2 мм²), що супроводжувалося різким стрибком коефіцієнта тертя та вібрації вузла. Якщо ж руйнування не відбувалося, експеримент зупиняли при досягненні заданого базового ресурсу, який становив 10^7 циклів навантаження.

5. Башта О.В., к.т.н., доц., доцент кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів КАІ.

Запитання: Сформулюйте конкретні практичні рекомендації, які ви пропонуєте для виробництва на основі Ваших досліджень. Яким матеріалознавчим та триботехнічним підґрунтям Ви обґрунтовуєте вибір саме таких технологічних параметрів обробки та визначені Вами галузі застосування розроблених покриттів?

Відповідь. Дякую за запитання. Для виробництва рекомендовано впроваджувати двоетапну лазерну обробку покриттів із формуванням дискретної сітки із кроком 4,5 мм та діаметром плями 2,5 мм для зміцнення високонавантажених вузлів тертя літаків та транспортних засобів. Це обґрунтовано створенням оптимального матеріалознавчого підґрунтя: гетерогенної структури з мікротвердістю 1020 HV та поля корисних стискальних напружень до -225 МПа, які блокують розвиток втомних тріщин і знижують інтенсивність зношування у 4–6 разів.

Запитання: Чи обмежувалися Ваші дослідження лише лабораторними зразками на машині СМЦ-2, чи розроблена технологія проходила перевірку на практичних елементах і конкретних деталях авіаційної чи транспортної техніки?

Відповідь. Дякую за запитання. Основний масив матеріалознавчих та триботехнічних випробувань проводився на модельних зразках, що дозволило забезпечити високу точність вимірювань і побудувати адекватні математичні моделі. Проте заключний етап досліджень включав натурні випробування реальних елементів, зокрема деталей злітно-посадкового шасі та шліцевих валів. Успішні результати цих досліджень дозволили підтвердити ефективність технології в реальних умовах та впровадити її у виробничий процес АТ “АНТОНОВ”.

Запитання: Поясніть кінетику розвитку мікродефектів у розроблених покриттях. Які геометричні параметри (довжину, розкриття) мають зародкові тріщини після первинної лазерної обробки і яка їхня доля на другому етапі? За рахунок яких фізичних механізмів забезпечується стримування їхнього росту чи локальна анігіляція у зонах дискретного впливу?

Відповідь. Дякую за запитання. Після першого етапу суцільного оплавлення в покриттях виникають поодинокі технологічні мікротріщини довжиною до 30–50 мкм та розкриттям 1–3 мкм. На другому етапі у зонах повторного лазерного переплаву ці мікродефекти повністю заліковуються за рахунок рідкофазного заповнення металом. У суміжних неоплавлених зонах подальший ріст тріщин повністю блокується термічною релаксацією розтягувальних напружень та їх трансформацією у корисні залишкові стискальні напруження (до -225 МПа).

Запитання: Уточніть, експериментальну базу Вашого дослідження. На якому саме науковому обладнанні та в яких сертифікованих лабораторіях проводилися металографічні дослідження і за допомогою яких приладів було отримано представлені в дисертації електронно-мікроскопічні знімки та карти мікрорентгеноспектрального аналізу?

Відповідь. Дякую за запитання. Металографічні дослідження та знімки мікроструктур були виконані в лабораторіях Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона.

Для оптичної мікроскопії використовувався металографічний мікроскоп MEM-10, а для високоточного аналізу субмікроструктури та поверхонь зношування – растровий (скануючий) електронний мікроскоп REM-106I, обладнаний системою мікрорентгеноспектрального аналізу.

6. Мікосянчик О.О., д.т.н., проф., завідувач кафедри прикладної механіки

та інженерії матеріалів КАІ.

Запитання: У чому полягає принципова різниця між локальним розподілом мікротвердості по глибині поверхневого шару на слайді 15 та кінетикою зміни ефективної мікротвердості трибосистеми під час припрацювання на слайді 19?

Відповідь. Дякую за запитання. Різниця полягає в тому, що на слайді 15 представлено стаціонарний покрововий розподіл локальної мікротвердості окремих фаз по глибині покриття після лазерної обробки. Натомість на слайді 19 наведено “ефективну мікротвердість” як інтегральну динамічну характеристику поверхні, яка змінюється в часі на етапі припрацювання внаслідок мікроструктурної адаптації, наклепу та формування вторинних структур під дією сил тертя.

Запитання: Поясніть фізичний зміст графіка інтенсивності зношування на слайді 19. Що саме прийнято за одиницю (базу порівняння) для показника відносної інтенсивності зношування, і які оптимальні параметри лазерної обробки зафіксовано на цій поверхні відгуку?

Відповідь. Дякую за запитання. Фізичний зміст графіка полягає в описі синергетичного впливу кроку сітки X_2 та діаметра плями X_3 на зносостійкість покриття, де за одиницю прийнято показник вихідного плазмово-напиленого шару без лазерної обробки. Зона мінімуму на поверхні відгуку чітко фіксує технологічний оптимум – формування дискретної сітки з кроком 4,5 мм ($X_2 = +1$) та діаметром плями 2,5 мм ($X_3 = -1$). Саме такі параметри забезпечують зниження інтенсивності зношування трибосистеми в 3–5 разів завдяки створенню раціональної гетерогенної структури, яка ефективно розподіляє навантаження та блокує розвиток дефектів.

Запитання: Якою була кількість паралельних випробувань при визначенні триботехнічних та механічних характеристик на одну експериментальну точку?

Відповідь. Дякую за запитання. Для забезпечення статистичної достовірності результатів у кожній експериментальній точці проводилося не менше 3-х паралельних випробувань для металографічних та твердометричних досліджень, і не менше 5-ти зразків-повторників для триботехнічних тестів на зношування та контактну втому, що повністю відповідає вимогам ДСТУ.

Після відповідей на запитання виступили:

Науковий керівник – член-кореспондент НАН України, д.т.н., проф., професор кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Аерокосмічного факультету КАІ Кіндрачук Мирослав Васильович.

Кіндрачук М.В.:

Костецький Іван Володимирович у 2021 році закінчив Національний авіаційний університет за спеціальністю 142 “Енергетичне машинобудування” (освітньо-професійна програма “Газотурбінні установки і компресорні станції”) та отримав диплом магістра. Продовживши навчання, у 2022 році він успішно закінчив магістратуру за спеціальністю 175 “Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка” (освітня програма “Якість, стандартизація та сертифікація”), отримавши другий диплом магістра. У 2023 році вступив до аспірантури за спеціальністю 131 “Прикладна механіка” кафедри прикладної

механіки та інженерії матеріалів Аерокосмічного факультету Державного університету “Київський авіаційний інститут”.

Варто відзначити, що І. В. Костецький демонстрував схильність до дослідницької роботи ще на етапі навчання в університеті: починаючи з другого курсу, він активно займався науковою діяльністю в Інституті новітніх технологій та лідерства, що заклало міцний фундамент його фахової підготовки. Високий рівень його академічних досягнень був визнаний на державному рівні: Костецький Іван став стипендіатом Благодійної організації Президентський фонд Леоніда Кучми “Україна” (посвідчення № 433 від 01 вересня 2018 року).

Під час навчання в аспірантурі Костецький І. В. у повному обсязі виконав освітні та наукові складові індивідуального плану. Він проявив себе як зрілий дослідник із яскраво вираженою здатністю до самостійної наукової та інженерної роботи, що спирається на ґрунтовну теоретичну підготовку в галузі матеріалознавства та трибології. Слід відзначити його активну участь у міжнародних конференціях та патентно-ліцензійній діяльності. За темою дисертації опубліковано 4,5 публікації у наукових фахових виданнях України, 1 із них у виданні, проіндексованому в базах даних Scopus/Web of Science, а також отримано патенти України № 158962 та № 161050.

Актуальність теми дисертації обумовлена необхідністю вирішення фундаментальної науково-прикладної задачі – підвищення ресурсу вузлів тертя авіаційної техніки. Автор запропонував інноваційний підхід: використання двоетапної лазерної модифікації для керування структурно-фазовим та напружено-деформованим станом евтектичних плазмових покриттів. Це дозволяє формувати заданий градієнт характеристик, що є критично важливим для високонавантажених трибоспрямижень.

Робота виконана на високому науково-теоретичному рівні. Здобувачем застосовано комплексний методологічний підхід, що поєднує електронну мікроскопію, рентгеноструктурний аналіз, оцінювання залишкових напружень методом $\sin^2\psi$ та прецизійні трибологічні випробування. Достовірність результатів підтверджена використанням сучасного сертифікованого обладнання та коректним застосуванням методів математичної статистики.

Особливої уваги заслуговують вперше встановлені закономірності формування градієнтних структур при поєднанні суцільного оплавлення та дискретної сітчасто-стілєникової обробки. Науковою новизною є обґрунтування механізму переходу від крихкого міжламелярного руйнування до в’язкопластичного зношування. Автором удосконалено енергетичний підхід до опису процесів припрацювання, що дозволяє прогнозувати кінетику руйнування через показники ефективної твердості та інтенсивності зношування.

Практичне значення роботи підтверджується актом реалізації результатів у виробничу діяльність АТ “АНТОНОВ”. Розроблено технологічні рекомендації лазерної обробки для покриттів систем Ni–Cr–B–Si та Fe–Cr–C–B. Отримані регресійні моделі мають високу прогностичну здатність і можуть бути впроваджені для зміцнення деталей пар ковзання авіаційного профілю. Результати досліджень також інтегровані у навчальний процес Національного університету “Київський авіаційний інститут”.

Дисертація Костецького Івана Володимировича є оригінальною (показник оригінальності – 95,67%), завершеною та цілісною науковою працею. Висунуті на захист положення повністю аргументовані.

Виходячи з вищезазначеного, вважаю, що освітня та наукова складові індивідуального плану роботи аспіранта Костецького І. В. виконані в повному обсязі. Дисертаційна робота за своїм змістом, обсягом та рівнем новизни повністю відповідає вимогам до робіт за спеціальністю 131 “Прикладна механіка”, а її автор заслуговує на присудження ступеня доктора філософії згідно з Порядком, затвердженим Постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 року.

Рецензенти дисертаційної роботи, які наголосили на позитивних аспектах дослідження та висловили свої побажання та зауваження:

Башта О. В., к.т.н., доц., доцент кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів КАІ: зазначив, що дисертація Костецького І. В. виконана на високому науково-методичному рівні, характеризується чіткою послідовністю викладу матеріалу та комплексним підходом до вирішення поставлених завдань. Сформульована в роботі мета повністю реалізована, а отримані результати ґрунтуються на сучасних методах експериментальних досліджень і математичного моделювання, що забезпечує їх високу достовірність. Запропонована автором технологія двоетапного лазерного модифікування плазмових евтектичних покриттів систем Fe–Cr–C–B та Ni–Cr–B–Si дозволяє формувати гетерогенні композиційні структури з високим рівнем адаптивності до зношування. Наукова новизна роботи полягає у глибокому аналізі процесів, які відбуваються в поверхневих шарах під дією комбінованого термічного впливу. Здобувачем уперше досліджено кінетику еволюції мікрodefектів і доведено, що технологічні мікротріщини після первинного суцільного оплавлення повністю анігілюють на другому етапі завдяки рідкофазному заповненню металом у зонах дискретного переплаву. Важливим теоретичним внеском є обґрунтування механізму релаксації розтягувальних напружень у суміжних ділянках та їх трансформації в корисні залишкові стискальні напруження (в діапазоні від -95 до -225 МПа), що ефективно блокує поширення defектів. Використовуючи математичне планування за планом 2³, автор побудував тривимірні поверхні відгуку та визначив строгий технологічний оптимум геометрії дискретної сітки: крок 4,5 мм та діаметр лазерної плями 2,5 мм. Практична цінність дослідження підтверджується масштабністю випробувань та їх успішним виходом за межі суто лабораторних тестів. Розроблені режими дозволили підвищити мікротвердість робочих поверхонь до 1020–1050 HV, знизити коефіцієнт тертя, збільшити у 4–6 разів контактну втомну довговічність, а також у 3–5 разів зменшити інтенсивність зношування трибосистем. Статистична надійність даних забезпечена виконанням від 3 до 5 паралельних випробувань на кожен експериментальну точку із залученням методів електронної та оптичної мікроскопії. Сформульовані рекомендації пройшли перевірку під час натурних випробувань реальних елементів злітно-посадкового шасі та шліцевих валів, що дозволило ефективно

впровадити результати у виробничий процес АТ “АНТОНОВ”.

Загалом, дисертація є завершеною, самостійно виконаною працею, яка за рівнем новизни, методичною строгістю та практичною значущістю повністю відповідає вимогам МОН України щодо здобуття ступеня доктора філософії, а її автор – Костецький І. В. заслуговує на його присвоєння за спеціальністю 131 “Прикладна механіка”.

Харченко О. В., к.т.н., доцент, доцент кафедри авіаційного транспорту КАІ: зазначила, що робота справляє позитивне враження, аргументована актуальність тематики досліджень. Наукова новизна та глибина роботи підтверджуються використанням комплексного підходу, що поєднує сучасні експериментальні методи з аналізом структурних змін у поверхневих шарах. Практична значущість результатів підтверджується можливістю їх використання для підвищення ресурсу та надійності вузлів тертя. Слід відзначити достатній обсяг експериментальних досліджень, використання сучасних методів аналізу та узгодженість отриманих результатів із поставленими завданнями. Висновки роботи є логічними та обґрунтованими. Особливу цінність у представленому дослідженні має успішна оптимізація параметрів двоетапного лазерного впливу на евтектичні плазмові покриття систем Fe–Cr–C–B та Ni–Cr–B–Si. Автор переконливо продемонстрував механізм повної анігіляції зародкових мікротріщин шляхом їх рідкофазного заліковування під час повторного дискретного переплаву, а також довів формування корисного стискального поля залишкових напружень. Експериментально підтверджене підвищення мікротвердості до рівня 1020–1050 HV та кратне зниження інтенсивності зношування трибосистем свідчать про глибокий інженерний та матеріалознавчий аналіз. Важливо, що розроблені технологічні режими пройшли успішну апробацію під час натурних випробувань реальних деталей злітно-посадкового шасі та шліцевих валів, а результати дослідження ефективно впроваджені у виробничу практику АТ “АНТОНОВ”. Матеріали дисертації опубліковані у провідних фахових виданнях, а автореферат та презентація повною мірою відображають її зміст. Зважаючи на високий науковий рівень, методичну строгість та очевидну практичну цінність, дисертаційна робота Костецького Івана Володимировича є завершеною кваліфікаційною працею, яка повністю відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України щодо здобуття ступеня доктора філософії, а її автор заслуговує на присвоєння ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 “Прикладна механіка”.

В обговоренні дисертаційного дослідження взяли участь:

Мнацаканов Р.Г., д.т.н., професор, професор кафедри авіаційного транспорту КАІ: підкреслив, що робота виконана на актуальну, прикладну і водночас фундаментальну тему, яка безпосередньо стосується надійності авіаційної техніки. Він зазначив, що підвищення ресурсу високонавантажених вузлів тертя є критично важливим завданням для сучасного авіабудування. Особливу цінність роботи становить вдале поєднання теоретичних засад фізичного матеріалознавства з розробкою конкретних інженерних рішень.

Досліднику вдалося глибоко розкрити фізику процесів, які відбуваються за двоетапного лазерного впливу, та довести переваги формування гетерогенної структури на базі систем Fe–Cr–C–B та Ni–Cr–B–Si. Важливим результатом є встановлення закономірностей зміни коефіцієнта тертя та кратне зниження інтенсивності зношування трибосистем за умов жорсткого навантаження. Професор окремо відзначив високу практичну орієнтованість дисертації, оскільки запропоновані автором технологічні режими та рекомендації не обмежилися лабораторними випробуваннями, а пройшли успішну апробацію під час натурних випробувань на АТ “АНТОНОВ”.

На завершення Мнацаканов Р.Г. констатував, що представлена дисертація є завершеною науковою працею, яка повністю задовольняє всі вимоги МОН України, а здобувач Костецький І. В. заслуговує на присвоєння ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 “Прикладна механіка”.

Мікосянчик О.О., д.т.н., проф., завідувач кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів КАІ: зазначила, що представлена дисертація є результатом тривалої, цілеспрямованої та глибокої наукової роботи здобувача на базі кафедри. Вона підкреслила, що Костецький І. В. проявив себе як зрілий науковець, здатний самостійно ставити та вирішувати складні міждисциплінарні завдання на стику прикладної механіки, фізичного матеріалознавства та триботехніки. Особливу увагу звернула на методичний рівень виконання роботи. Автор не просто розробив технологію двоетапного лазерного модифікування, а запропонував чітко обґрунтовану концепцію управління структурою і властивостями евтектичних покриттів. Проведені ним математична оптимізація та побудова поверхонь відгуку дозволили перевести емпіричні пошуки у площину інженерного розрахунку, що забезпечило отримання раціональних параметрів дискретної сітки. Зaslугою здобувача є також детальне вивчення триботехнічної адаптації поверхонь та кінетики формування вторинних структур при терті, що пояснює довговічність розроблених шарів.

Як завідувач кафедри, гарант ОНП, професор Мікосянчик О. О. констатувала, що робота повністю відповідає паспорту спеціальності 131 та вимогам МОН України. Зважаючи на теоретичну цінність та практичні результати, впроваджені на авіаційному підприємстві, вона підтримує дисертаційне дослідження і вважає, що Костецький І. В. заслуговує на присвоєння ступеня доктора філософії.

Носко П.Л., д.т.н., проф., професор кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів КАІ: зазначив, що робота виконана ґрунтовно і є прикладом глибокого, завершеного інженерно-наукового дослідження. Він підкреслив, що розробка нових способів підвищення триботехнічної надійності важконавантажених спряжень є класичною, але завжди гострою проблемою для сучасної механічної інженерії. Звернув особливу увагу на конструктивно-технологічний аспект дисертації. На особливу оцінку заслуговує запропонована здобувачем концепція дискретного зміцнення, яка дозволяє раціонально поєднувати високу зносостійкість гетерогенних лазерних треків із демпфувальними властивостями пластичнішої матриці. Це вкрай важливо для реальних вузлів тертя (трансмісійних валів та елементів шасі), які під час

експлуатації зазнають не лише абразивного впливу, а й значних динамічних і контактних навантажень. Професор відзначив коректність та високу точність побудованих математичних моделей і поверхонь відгуку за результатами факторного експерименту, що дало змогу чітко обґрунтувати геометрію лазерної сітки. Успішне впровадження цих результатів на такому передовому підприємстві, як АТ “АНТОНОВ”, є беззаперечним свідченням практичної цінності та достовірності роботи.

На завершення П.Л. Носко зазначив, що дисертаційне дослідження Костецького І. В. повністю відповідає всім критеріям та вимогам МОН України щодо робіт на здобуття ступеня доктора філософії, а сам автор є фахівцем, який заслуговує на присвоєння ступеня за спеціальністю 131 “Прикладна механіка”.

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Костецького Івана Володимировича на тему “Триботехнічні властивості модифікованих лазерною обробкою евтектичних плазмових покриттів”, поданої на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 13 “Механічна інженерія” за спеціальністю 131 “Прикладна механіка”

1. Обґрунтування вибору теми дослідження. Сучасний розвиток авіаційної техніки та транспортної галузі супроводжується підвищенням вимог до надійності й довговічності деталей машин та вузлів тертя. Основними причинами їхнього передчасного виходу з ладу є інтенсивне зношування, фретинг-корозія та високотемпературне окиснення поверхневих шарів. У зв’язку з цим актуальним є створення ефективних методів поверхневого зміцнення матеріалів із підвищеними триботехнічними характеристиками.

Перспективним напрямом вирішення цієї проблеми є застосування евтектичних покриттів, сформованих методами електроіскрового легування та газотермічного напилення. Такі покриття забезпечують високу твердість, зносостійкість і адгезійну міцність, однак їхні властивості значною мірою залежать від структурного стану поверхневого шару та режимів подальшої обробки.

Одним із найбільш ефективних способів керування структурою та властивостями покриттів є лазерна обробка. Вона забезпечує локальне високошвидкісне нагрівання й охолодження поверхні, сприяє подрібненню структури, зменшенню пористості та перерозподілу зміцнювальних фаз, що дозволяє підвищити мікротвердість, зносостійкість і контактну витривалість покриттів.

Разом із тим, закономірності впливу параметрів лазерної обробки на процеси структуроутворення та триботехнічні властивості евтектичних покриттів залишаються недостатньо дослідженими. Це обумовлює актуальність проведення досліджень, спрямованих на встановлення взаємозв’язку між режимами лазерної

обробки, структурою поверхневого шару та експлуатаційними характеристиками покриттів.

Отже, вибір теми дослідження є науково обґрунтованим і має важливе практичне значення для підвищення ресурсу та надійності деталей машин.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Дисертаційна робота виконана в рамках наукових досліджень кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів КАІ і є складовою частиною бюджетної науково-дослідної теми 446-ДБ23 “Розроблення інноваційних технологій поверхневого зміцнення та відновлення деталей авіаційної техніки та техніки спеціального призначення” (0123U101532, з 01.04.2023 по 31.12.2025), спрямованої на вирішення актуальних проблем трибології, інженерії поверхні та комбінованих методів поверхневого зміцнення деталей машин. Робота повністю відповідає пріоритетним науковим напрямкам КАІ у галузі підвищення зносостійкості, надійності та довговічності конструкційних матеріалів і елементів авіаційної техніки.

У межах зазначеної теми автором проведено комплекс теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на підвищення зносостійкості пари тертя шляхом створення градієнтних зносостійких структур на основі евтектичних плазмових покриттів систем Ni–Cr–B–Si та Fe–Cr–C–B, модифікованих двоетапною лазерною обробкою. Виконано оцінку впливу лазерної модифікації на структурно-фазовий стан, напружено-деформований стан, закономірності припрацювання, механізми зношування та контактну втому покриттів. Отримано два патенти України та забезпечено впровадження результатів на АТ “АНТОНОВ”.

Тема дисертації відповідає освітньо-науковій програмі “Прикладна механіка” за спеціальністю 131 “Прикладна механіка” галузі знань 13 “Механічна інженерія” в КАІ (зокрема, ОК 1.3.1, ОК 1.3.3).

3. Мета і завдання дослідження полягала у теоретичному обґрунтуванні та експериментальному встановленні закономірностей формування структури, напружено-деформованого стану і триботехнічних властивостей евтектичних плазмових покриттів систем Ni–Cr–B–Si та Fe–Cr–C–B після двоетапної лазерної модифікації для підвищення їх зносостійкості, контактної витривалості та ресурсу роботи в умовах тертя ковзання.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися такі *завдання*:

- проаналізувати сучасний стан проблеми підвищення зносостійкості деталей і вузлів тертя авіаційної та машинобудівної техніки, визначити основні механізми їх зношування та обґрунтувати доцільність застосування евтектичних плазмових покриттів;

- дослідити енергетичні підходи до аналізу процесів руйнування та зношування поверхневих шарів і встановити їх взаємозв'язок із формуванням градієнтних зносостійких структур;

- вивчити особливості формування мікроструктури, фазового складу та дефектного стану евтектичних плазмових покриттів після плазмового напилення й встановити вплив двоетапної лазерної модифікації на їх структурний стан;

– встановити закономірності зміни напружено-деформованого стану покриттів під впливом лазерної обробки та оцінити його вплив на тріщиностійкість і контактну витривалість;

– дослідити триботехнічні характеристики лазерно-модифікованих евтектичних покриттів (коефіцієнт тертя, інтенсивність зношування, контактну втому) на підкладках зі сталі 45 та титанового сплаву ВТ6, а також визначити механізми їх припрацювання та руйнування;

– розробити математичні моделі впливу параметрів лазерної обробки на властивості покриттів і виконати багатокритеріальну оптимізацію технологічних режимів для забезпечення максимальних триботехнічних характеристик;

– розробити практичні рекомендації щодо застосування двоетапної лазерної модифікації евтектичних плазмових покриттів для підвищення довговічності високонавантажених вузлів тертя машинобудівної та авіаційної техніки.

4. Об’єкт дослідження – процеси формування структури, напружено-деформованого стану та зношування евтектичних плазмових покриттів у процесі лазерної модифікації.

5. Предмет дослідження – закономірності структурно-фазових перетворень, зміни напружено-деформованого стану та триботехнічних властивостей евтектичних плазмових покриттів при двоетапній лазерній обробці.

6. Методи дослідження.

Для досягнення поставленої мети використано комплекс взаємодоповнюючих методів досліджень, що забезпечують достовірність та обґрунтованість отриманих результатів.

Теоретичні дослідження базуються на положеннях трибології, фізики міцності та руйнування, а також енергетичних підходах до аналізу процесів зношування. Математичне моделювання виконано із застосуванням методів планування експерименту (повний факторний експеримент типу 2^3), а також методів регресійного та дисперсійного аналізу.

Експериментальні дослідження включали формування евтектичних покриттів систем Ni–Cr–B–Si та Fe–Cr–C–B методом плазмового напилення на підкладках зі сталі 45 та титанового сплаву ВТ6. Лазерну модифікацію покриттів здійснювали із застосуванням лазера безперервної дії у два етапи: суцільне оплавлення та дискретна сітчасто-стілєникова обробка.

Дослідження мікроструктури покриттів проводили методом растрової електронної мікроскопії з використанням мікроскопа РЕМ-106И відповідно до рекомендацій ASTM E986. Фазовий склад визначали методом рентгеноструктурного аналізу на дифрактометрі ДРОН-3М згідно зі стандартом ASTM E975.

Вимірювання мікротвердості здійснювали методом Віккерса відповідно до стандартів ISO 6507-1:2018 та ASTM E384 із використанням мікротвердоміра ПМТ-3. Оцінювання напружено-деформованого стану виконували рентгенівським методом $\sin^2\psi$ відповідно до стандарту ASTM E915.

Трибологічні випробування проводили за схемою «ролик–ролик» на машині тертя СМЦ-2 відповідно до стандартів ASTM G77 та ISO 7148-1 в умовах тертя без мастильного матеріалу при варіюванні навантаження та швидкості ковзання.

Інтенсивність зношування визначали гравіметричним методом із використанням аналітичних ваг Axis ANG200C (клас точності не нижче 0,1 мг) відповідно до ASTM G99. Аналіз механізмів руйнування поверхонь тертя здійснювали методом фрактографії із застосуванням SEM.

Обробку експериментальних даних виконували із застосуванням методів математичної статистики відповідно до ISO 3534, зокрема дисперсійного та регресійного аналізу, що забезпечило оцінювання адекватності моделей і достовірності отриманих результатів.

7. Наукова новизна дослідження базується на таких основних положеннях:

уперше:

- встановлено закономірності формування градієнтної структури евтектичних плазмових покриттів систем Ni–Cr–B–Si та Fe–Cr–C–B при двоетапній лазерній модифікації (суцільне оплавлення та дискретна сітчастостільникова обробка), що полягають у спрямованій трансформації ламелярної пористої структури у щільну дрібнодисперсну структуру з керованим розподілом фазового складу та властивостей за глибиною покриття;

- встановлено механізм еволюції руйнування евтектичних покриттів в умовах контактної-втомного навантаження, який визначається зміною характеру локалізації напружень та полягає у переході від міжламелярного крихкого руйнування до в'язкопластичного механізму з домінуванням мікродеформаційних процесів після дискретної лазерної обробки;

- встановлено закономірності зміни напружено-деформованого стану покриттів при двоетапній лазерній модифікації, що полягають у релаксації розтягувальних та формуванні стискальних залишкових напружень у поверхневому шарі, які забезпечують підвищення тріщиностійкості та контактної витривалості;

- отримано кількісні регресійні залежності типу «параметри лазерної обробки – структурні характеристики – триботехнічні властивості», які адекватно описують вплив потужності випромінювання, швидкості обробки та навантаження на коефіцієнт тертя й інтенсивність зношування та можуть бути використані для прогнозування поведінки покриттів у трибосистемах.

удосконалено:

- енергетичний підхід до опису процесів припрацювання та зношування покриттів, який, на відміну від існуючих, враховує кінетику зміни ефективної твердості, інтенсивності зношування та її похідної (dI/dt), що дозволяє кількісно ідентифікувати стадії припрацювання та стабілізації трибосистеми;

- методичні підходи до комплексного оцінювання впливу лазерної модифікації на властивості покриттів за рахунок узгодженого врахування структурно-фазового стану, напружено-деформованих параметрів і триботехнічних характеристик у межах єдиної аналітичної схеми.

набули подальшого розвитку:

- наукові положення щодо формування залишкових напружень у газотермічних покриттях після лазерної обробки з урахуванням впливу дискретної модифікації на перерозподіл напружень та зниження їх градієнтів;

– уявлення про взаємозв'язок між параметрами мікроструктури (пористістю, дисперсністю, фазовим складом, дефектністю), напружено-деформованим станом і триботехнічними характеристиками покриттів, що забезпечує можливість цілеспрямованого керування їх експлуатаційними властивостями;

– підходи до багатокритеріальної оптимізації параметрів лазерної обробки покриттів, які базуються на одночасному врахуванні комплексу критеріїв якості (інтенсивності зношування, коефіцієнта тертя та напруженого стану) і забезпечують підвищення довговічності покриттів.

8. Теоретичне значення. Теоретичне значення дисертаційної роботи полягає у розвитку наукових положень трибології, матеріалознавства та інженерії поверхні щодо закономірностей формування структури, напружено-деформованого стану і триботехнічних властивостей евтектичних плазмових покриттів після двоетапної лазерної модифікації.

У роботі встановлено взаємозв'язок між параметрами лазерної обробки, структурно-фазовим станом, залишковими напруженнями та експлуатаційними характеристиками покриттів, що дозволило поглибити наукові уявлення про механізми структуроутворення, припрацювання та контактено-втомного руйнування поверхневих шарів у трибосистемах.

Подальшого розвитку набули енергетичні підходи до аналізу процесів тертя і зношування, а також методичні підходи до оцінювання впливу лазерної модифікації на формування градієнтних зносостійких структур. Отримані регресійні залежності та математичні моделі розширюють теоретичні основи прогнозування триботехнічної поведінки евтектичних покриттів в умовах тертя ковзання.

Результати дослідження можуть бути використані як теоретична база для подальшого розвитку технологій лазерного поверхневого зміцнення, математичного моделювання процесів зношування та створення функціональних покриттів із керованими властивостями.

9. Практичне значення та використання результатів дисертаційного дослідження. Практичне значення дисертаційної роботи полягає у розробленні технології двоетапної лазерної модифікації евтектичних плазмових покриттів систем Ni–Cr–B–Si та Fe–Cr–C–B, яка забезпечує підвищення зносостійкості, контактної витривалості та ресурсу роботи деталей вузлів тертя авіаційної техніки й машин загального машинобудування.

Результати роботи впроваджено в навчальний процес КАІ під час викладання дисциплін “Інженерія поверхні”, “Методи обробки поверхонь матеріалів”, а також при формуванні тематики кваліфікаційних робіт магістрів спеціальності G9 “Прикладна механіка” (акт про впровадження від 17.01.2026).

Результати дисертаційної роботи також впроваджено в АТ “АНТОНОВ”, де запропоновано технологію двоетапної лазерної модифікації евтектичних плазмових покриттів для зміцнення високонавантажених деталей вузлів тертя. Розроблено режими лазерної обробки та технологічні рекомендації щодо формування градієнтних поверхневих шарів із підвищеною мікротвердістю, зносостійкістю та контактною витривалістю. Застосування технології забезпечує

підвищення ресурсу валів, втулок і пар ковзання у 2,5–4,0 рази та зниження інтенсивності зношування у 3–5 разів (акт про впровадження від 28.04.2026).

10. Особистий внесок здобувача. Дисертація “Триботехнічні властивості модифікованих лазерною обробкою евтектичних плазмових покриттів” є самостійною науковою працею, у якій викладено теоретичні положення, висновки, власні ідеї та розробки автора, що забезпечили вирішення поставлених завдань. Усі висновки та практичні рекомендації, винесені на захист, розроблені здобувачем особисто. Використані в дисертації ідеї, положення чи гіпотези інших авторів мають відповідні посилання та застосовані виключно для підтвердження і підкріплення власних результатів дослідження.

11. Апробація результатів дослідження. Найважливіші ідеї, висновки, рекомендації, отримані в дисертації, оприлюднені на наукових та науково-практичних конференціях, у тому числі міжнародних, всеукраїнських та за міжнародною участю: “ABIA- 2023” (Київ, 2023), “Актуальні задачі сучасних технологій” (м. Тернопіль, 2024.).

12. Публікації. Основні положення та результати дисертаційного дослідження викладено в 6,5 наукових публікаціях, серед них 4,5 публікації у наукових фахових виданнях України, 1 із них у виданні, проіндексованому в базі даних Scopus/Web of Science, 2 публікації у збірниках матеріалів конференцій.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Статті у наукових фахових виданнях України категорії Б:

1. Кіндрачук М. В., Стебелецька Н. М., Гловин М. А., **Костецький І. В.** Закономірності впливу термодинамічного стану на триботехнічні властивості евтектичних покриттів. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. № 1(98). С. 47–54. DOI: [10.18372/0370-2197.1\(98\).17358](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(98).17358).

Особистий внесок І. Костецького: встановлення закономірностей впливу термодинамічного стану на триботехнічні властивості евтектичних покриттів, аналіз експериментальних даних та формулювання висновків щодо зміни механізмів зношування;

Особистий внесок М. Кіндрачука: постановка задачі дослідження, формування методології експерименту та наукове керівництво роботою;

Особистий внесок Н. Стебелецької: аналіз літературних джерел, обробка експериментальних даних та участь у підготовці матеріалів до публікації;

Особистий внесок М. Гловина: проведення експериментальних досліджень, аналіз впливу термодинамічного стану на триботехнічні властивості та узагальнення результатів.

2. Гуменюк І. А., Харченко В. В., Гловин М. А., **Костецький І. В.** Вплив термічної обробки на триботехнічні властивості евтектичного електроіскрового покриття. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. № 2(99). С. 84–89. DOI: [10.18372/0370-2197.2\(99\).17629](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(99).17629).

Особистий внесок І. Костецького: аналіз впливу термічної обробки на триботехнічні характеристики евтектичних покриттів, обробка результатів випробувань і та редагування рукопису статті;

Особистий внесок І. Гуменюка: постановка наукової задачі, визначення напрямів дослідження та координація виконання роботи;

Особистий внесок В. Харченка: участь у розробці методики досліджень, аналіз літературних джерел та підготовка матеріалів статті;

Особистий внесок М. Гловина: експериментальні дослідження впливу термічної обробки на триботехнічні характеристики покриттів, обробка та інтерпретація результатів.

3. Кіндрачук М. В., Харченко В. В., Марчук В. Є., Гуменюк І. А., Гловин М. А., **Костецький І. В.** Комбінований метод поверхневого зміцнення швидкорізальних сталей. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. № 3(100). С. 73–78. DOI: [10.18372/0370-2197.3\(100\).17896](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(100).17896).

Особистий внесок І. Костецького: участь у дослідженні комбінованих методів поверхневого зміцнення швидкорізальних сталей, аналіз триботехнічних характеристик та узагальнення отриманих результатів;

Особистий внесок М. Кіндрачука: формування концепції комбінованого методу поверхневого зміцнення, наукове керівництво дослідженням та узагальнення результатів;

Особистий внесок В. Харченка: розроблення технологічних параметрів зміцнення та участь у підготовці експериментальної методики;

Особистий внесок В. Марчука: проведення аналізу властивостей швидкорізальних сталей та обробка експериментальних даних;

Особистий внесок І. Гуменюка: участь у проведенні триботехнічних випробувань та аналізі отриманих результатів;

Особистий внесок М. Гловина: участь у розробленні комбінованого методу зміцнення та експериментальне дослідження його ефективності.

4. Кіндрачук М. В., Стебелецька Н. М., Харченко В. В., Гловин М. А., **Костецький І. В.** Закономірності зношування детонаційних покриттів на титановому сплаві ВТ-22. *Проблеми тертя та зношування*. 2024. № 1(102). С. 52–61. DOI: [10.18372/0370-2197.1\(102\).18417](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(102).18417).

Особистий внесок І. Костецького: аналіз закономірностей зношування покриттів на титанових сплавах, інтерпретація результатів трибологічних досліджень та встановлення механізмів руйнування;

Особистий внесок М. Кіндрачука: постановка наукової задачі, координація дослідження та формування основних напрямів роботи;

Особистий внесок Н. Стебелецької: аналіз літературних джерел, участь у підготовці експериментальних досліджень та обробці результатів;

Особистий внесок В. Харченка: експериментальні дослідження детонаційних покриттів та оцінювання їх триботехнічних характеристик;

Особистий внесок М. Гловина: аналіз закономірностей зношування покриттів та узагальнення експериментальних результатів.

5. Харченко В. В., Кіндрачук М. В., Марчук В. Є., Юрчук А. О., **Костецький І. В.** Комбінована обробка і механізм зношування азотованих покриттів на титановому сплаві ВТ-6. *Проблеми тертя та зношування*. 2024. № 2(103). С. 121–129. DOI: [10.18372/0370-2197.2\(103\).18694](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(103).18694).

Особистий внесок І. Костецького: проведення мікроструктурних досліджень, аналіз результатів рентгеноструктурного аналізу, участь в інтерпретації отриманих результатів та підготовці статті до публікації;

Особистий внесок В. Харченка: постановка задач дослідження, формування концепції комбінованої обробки, аналіз механізмів зношування азотованих покриттів та узагальнення результатів досліджень;

Особистий внесок М. Кіндрачука: наукове керівництво роботою, формування методології досліджень, аналіз триботехнічних процесів та редагування матеріалів статті;

Особистий внесок В. Марчука: проведення лазерної та хіміко-термічної обробки зразків, дослідження структури поверхневих шарів і аналіз режимів зміцнення;

Особистий внесок А. Юрчука: виконання експериментальних трибологічних досліджень, визначення показників зношування та обробка експериментальних даних.

6. Харченко В. В., Кіндрачук М. В., Савчук П. П., **Костецький І. В.**, Гловин М. А. Локальний характер напружено-деформованого стану під час лазерної обробки. *Проблеми тертя та зношування*. 2024. № 3(104). С. 46–53. DOI: [10.18372/0370-2197.3\(104\).18980](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(104).18980).

Особистий внесок І. Костецького: дослідження напружено-деформованого стану при лазерній обробці, аналіз експериментальних результатів і формулювання висновків щодо локального характеру розподілу напружень;

Особистий внесок В. Харченка: постановка задачі дослідження, розроблення методики лазерної обробки та координація виконання роботи;

Особистий внесок М. Кіндрачука: наукове керівництво дослідженням, аналіз теоретичних аспектів напружено-деформованого стану та узагальнення результатів;

Особистий внесок П. Савчука: дослідження напружено-деформованого стану та аналіз впливу лазерної обробки проведення експериментальних досліджень параметрів лазерної обробки та обробка отриманих даних;

Особистий внесок М. Гловина: проведення експериментальних досліджень параметрів лазерної обробки та обробка отриманих даних.

7. Kindrachuk M. V., Kharchenko V. V., Humeniuk I. A., Hlovyn M. A., **Kostetskyi I. V.** Analysis of running-in processes in tribological systems. *Проблеми тертя та зношування*. 2025. № 1(106). С. 98–104. DOI: [10.18372/0370-2197.1\(106\).19837](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(106).19837).

Особистий внесок І. Костецького: дослідження процесів припрацювання трибосистем, обробка експериментальних даних та встановлення закономірностей зміни інтенсивності зношування;

Особистий внесок М. Кіндрачука: постановка наукової задачі, формування концепції дослідження процесів припрацювання та наукове керівництво роботою;

Особистий внесок В. Харченка: розроблення методики експериментальних досліджень та аналіз триботехнічних характеристик систем;

Особистий внесок І. Гуменюка: проведення експериментальних випробувань і обробка отриманих результатів;

Особистий внесок М. Гловина: аналіз процесів припрацювання трибологічних систем та інтерпретація експериментальних даних.

Статті у наукових фахових виданнях України категорії А:

8. Kindrachuk M. V., Kharchenko V. V., Marchuk V. Ye., Humeniuk I. A., Stebeleetska N. M., Hlovyn M. A., **Kostetskyi I. V.** Regularities of fretting-corrosion wear of coatings formed by gas-thermal spraying methods. *Functional Materials*. 2024. Vol. 31, No.2. P. 192–198. DOI: [10.15407/fm31.02.192](https://doi.org/10.15407/fm31.02.192) (Scopus, Q4. ISSN: 1027-5495).

Особистий внесок І. Костецького: аналіз закономірностей фретинг-корозійного зношування газотермічних покриттів, узагальнення результатів для міжнародної публікації.

Особистий внесок М. Кіндрачука: постановка наукової задачі, формування концепції дослідження та загальне наукове керівництво роботою;

Особистий внесок В. Харченка: розроблення методики дослідження та участь у аналізі механізмів фретинг-корозійного зношування покриттів;

Особистий внесок В. Марчука: проведення експериментальних досліджень та обробка результатів випробувань покриттів;

Особистий внесок І. Гуменюка: виконання аналізу експериментальних даних та підготовка графічних матеріалів;

Особистий внесок Н. Стебелецької: літературний огляд, узагальнення результатів та підготовка тексту міжнародної публікації;

Особистий внесок М. Гловина: дослідження механізмів зношування покриттів та узагальнення результатів для міжнародної публікації.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

1. Кіндрачук М. В., Гловин М. А., **Костецький І. В.**, Стебелецька Н. М. Керування триботехнічними властивостями евтектичних покриттів ступенем їхнього невірноваженого стану. *ABIA-2023* : матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції, м. Київ, 18–21 квітня 2023 р. / НАУ. Київ, 2023. С. 1.10–1.14. URL: <https://conference.nau.edu.ua/index.php/AVIA/AVIA2023/paper/view/9244/7529>.

2. Гловин М. А., **Костецький І. В.** Вплив відпалу на триботехнічні властивості евтектичного електроіскрового покриття. *Актуальні задачі сучасних технологій* : матеріали XIII Міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, м. Тернопіль, 11–12 груд. 2024 р. / ТНТУ. Тернопіль, 2024. С. 54–55. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/47939/2/MNPK_2024_Hlovyn_M_A-Influence_of_annealing_on_54-55.pdf.

13. Структура та обсяг дисертації. Дисертація містить анотації українською та англійською мовами, вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та додатки. Список використаних джерел налічує 134 найменування. Обсяг основної частини дисертації становить 132 сторінки,

загальний обсяг дисертації складає 176 сторінок. Загалом у роботі міститься 25 таблиць, 51 рисунок та 3 додатки.

14. Характеристика особистості здобувача. Костецький І.В. за період підготовки дисертаційної роботи зарекомендував себе як цілеспрямований, відповідальний і високопродуктивний науковець. Проявив глибокі професійні знання, самостійність і творчий підхід до вирішення складних науково-технічних завдань.

Здобувач демонстрував високу працездатність, дисциплінованість, вміння ефективно поєднувати експериментальну роботу з теоретичним аналізом і практичним впровадженням результатів. Іван Володимирович активно працював з сучасним обладнанням, володіє необхідними методами дослідження та вміє чітко формулювати та відстоювати наукові положення.

15. Оцінка мови та стилю дисертації. Текст дисертації викладено фаховою українською мовою. Текстове подання матеріалу відповідає стилю науково-дослідної літератури. Матеріали дослідження оформлені відповідно до вимог Міністерства освіти і науки України.

16. Відповідність принципам академічної доброчесності. Дисертація не містить необґрунтованих запозичень та плагіату. У роботі дотримано правила посилання на джерела інформації у випадку використання підходів, положень, тверджень, відомостей. Надано достовірну інформацію про результати досліджень, джерела використаної інформації.

17. Рецензенти рекомендують: відповідно до **пп. 15, 16** Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44, ***пропонується такий склад разової ради:***

Голова ради:

Мікосянчик Оксана Олександрівна, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Аерокосмічного факультету КАІ.

Рецензенти:

Башта Олександр Васильович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Аерокосмічного факультету КАІ;

Харченко Олена Василівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри авіаційного транспорту КАІ.

Офіційні опоненти:

Кушнарєва Ольга Сергіївна, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу фізико-хімічних досліджень матеріалів (№22) Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона, Національної академії наук України;

Лопата Лариса Анатоліївна, кандидат технічних наук, доцент, науковий співробітник відділу міцності матеріалів і елементів конструкцій в термосилових полях і газових потоках (№6) Інституту проблем міцності імені Г.С. Писаренка.

Усі члени разової спеціалізованої вченої ради не мають реального чи потенційного конфлікту інтересів щодо здобувача Костецького Івана Володимировича (зокрема, є його близькою особою) та/або його наукового керівника.

У результаті попередньої експертизи дисертації Костецького Івана Володимировича і повноти публікації основних результатів дослідження

УХВАЛЕНО:

1. Затвердити висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Костецького Івана Володимировича на тему “Триботехнічні властивості модифікованих лазерною обробкою евтектичних плазмових покриттів”.

2. Вважати, що за актуальністю, ступенем новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною цінністю здобутих результатів дисертація Костецького Івана Володимировича відповідає спеціальності 131 “Прикладна механіка” та вимогам Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у вищих навчальних закладах (наукових установах), затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 року. № 261 (зі змінами і доповненнями від 03 квітня 2019 року № 283), вимогам пп. 6, 7, 8, 9 “Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії”, затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44.

3. Рекомендувати дисертаційну роботу “Триботехнічні властивості модифікованих лазерною обробкою евтектичних плазмових покриттів”, подану Костецьким Іваном Володимировичем на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 13 “Механічна інженерія”, за спеціальністю 131 “Прикладна механіка”.

4. Рекомендувати Вченій раді затвердити склад разової спеціалізованої вченої ради:

Голова ради:

Мікосянчик Оксана Олександрівна, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Аерокосмічного факультету КАІ.

Рецензенти:

Башта Олександр Васильович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Аерокосмічного факультету КАІ;

Харченко Олена Василівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри авіаційного транспорту КАІ.

Офіційні опоненти:

Кушнарєва Ольга Сергіївна, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу фізико-хімічних досліджень матеріалів (№22) Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона, Національної академії наук України;

Лопата Лариса Анатоліївна, кандидат технічних наук, доцент, науковий співробітник відділу міцності матеріалів і елементів конструкцій в термосилових полях і газових потоках (№6) Інституту проблем міцності імені Г.С. Писаренка.

Результати голосування щодо рекомендації до захисту дисертації Костецького Івана Володимировича:

“за” – 17

“проти” – немає

“утримались” – немає

Головуючий на засіданні:

професор кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів КАІ, д.т.н., професор

Павло НОСКО

Секретар засідання:

доцент кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів КАІ, к.т.н., доцент

Світлана БОГДАН

ПОГОДЖЕНО:

проректор з наукових досліджень та трансферу технологій КАІ, д.т.н., професор

Сергій ГНАТЮК