Голові разової спеціалізованої вченої ради PhD 14951
Тернопільського національного технічного
університету імені Івана Пулюя
д.т.н., професору Яснію Володимиру Петровичу

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора філософії Рибака Іллі Петровича на дисертаційну роботу

Семегена Володимира Олеговича

«Забезпечення параметрів якості при формуванні частково регулярних мікрорельєфів на плоских поверхнях», подану до захисту на здобуття наукового ступеня **доктора філософії** з галузі знань 13 «Механічна інженерія» спеціальності 131 «Прикладна механіка»

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Надійність та довговічність машинобудівної продукції значною мірою визначаються станом робочих поверхонь важконавантажених пар тертя, що працюють в умовах високих питомих тисків і підвищених температур. За таких умов навіть короткочасне порушення режиму мащення призводить до адгезійної взаємодії контактуючих поверхонь та їх схоплювання, що спричиняє задири, прискорене зношування та передчасний вихід вузла з ладу. Економічні наслідки таких відмов – позапланові простої обладнання, витрати на ремонт і заміну деталей – обумовлюють стійкий практичний запит машинобудівних підприємств на технологічні рішення, здатні запобігати схоплюванню без суттєвого здорожчання виробничого циклу.

Традиційний шлях підвищення якості поверхні – зниження її шорсткості відповідно до нормативних вимог у випадку важконавантажених пар тертя себе вичерпує: зменшення шорсткості не усуває причину адгезії і не гарантує відсутності дефектів при пікових навантаженнях. Альтернативою є формування на робочих поверхнях регулярного мікрорельєфу, який утримує мастильний матеріал у мікроканавках забезпечуючи його наявність в умовах пікових

навантажень. Існуючі способи його створення фрезерування на верстатах з ЧПК забезпечують високу точність, проте характеризуються значною вартістю обладнання та тривалістю обробки, що обмежує їх застосування в умовах серійного виробництва. Вібраційне обкочування є продуктивнішою альтернативою для плоских поверхонь, однак наукового обґрунтування взаємозв'язку між геометричними параметрами частково регулярного мікрорельєфу, режимами його формування та комплексом параметрів якості поверхні шорсткістю, мікротвердістю, маслоємністю на сьогодні недостатньо. Відсутність відповідних аналітичних залежностей не дозволяє обґрунтовано призначати технологічні режими формування мікрорельєфу під задані параметри якості поверхні, що змушує виробників покладатися на емпіричний підбір режимів формуваня.

Таким чином, актуальність дисертаційного дослідження визначається необхідністю встановлення закономірностей впливу геометричних параметрів частково регулярних мікрорельєфів та режимів їх формування на параметри якості плоских поверхонь пар тертя, що дозволить науково обґрунтовано призначати технологічні режими обробки для підвищення зносостійкості та довговічності відповідальних вузлів машин при мінімізації виробничих витрат.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, темами

Дисертаційна робота виконана на кафедрі автотранспорту та логістики Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. Тематика роботи пов’язана із науковим напрямом кафедри – підвищення ресурсу роботи важкованавантажених пар тертя деталей транспорту. Дослідження також було виконано у межах ініціативної НДР «Наукові основи покращення експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей технологічними методами» (№0125U003762). Крім цього дисертаційна робота відповідає переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок «Нові матеріали та речовини спеціального призначення з унікальними властивостями і функціональними характеристиками та технології їх виготовлення».

3. Наукова та практична новизна результатів дисертаційної роботи

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розвитку науково-методологічних основ забезпечення параметрів якості поверхонь пар тертя при формуванні на них регулярних мікрорельєфів, а саме:

– набуло подальшого розвитку математичне моделювання кінематики формування мікрогеометрії при вібраційному обкочуванні плоских поверхонь. Отримані аналітичні залежності для прогнозувати відносної площі мікрорельєфів I–III типів, що сформовані вібраційним обкочуванням в залежності від режимів їх формування – подачі та кількості подвійних ходів;

– встановлено статистично значущі закономірності (на базі методології багатофакторного дисперсійного аналізу ANOVA) впливу режимів формування та геометричних параметрів мікрорельєфу на параметри шорсткості поверхні та її маслоємність. Науково доведено, що подача має суттєвий вплив лише на висоту нерівностей профілю поверхні, тоді як вона істотно не впливає на здатність поверхні з сформованим РМР утримувати мастило та на відносну опорну довжину профілю поверхні. Також встановлено, що серед досліджуваних типів мікрорельєфів I та III типи демонструють кращу комбінацію функціональних властивостей, ніж II тип ЧРМР, який показав найнижчі результати за параметрами шорсткості поверхні та малоємністю поверхні;

– встановлено, що стандартизована методика розрахунку площі канавок та критерію R_{ak2}, наведена в стандарті EN ISO 21920-2, є недостатньо придатною для частково регулярних ЧРМР через відмінності у формах діаграм зношування (кривих Аббота-Фаєрстоуна). Виявлено, що при побудові діаграм зношування існує додаткова площа, яка не враховується при визначенні параметра R_{ak2}, а отже функціональний параметр, що характеризує здатність ЧРМР утримувати мастило, занижений. Це дає підстави для подальших досліджень інших методів визначення критерію R_{ak2} з метою врахування цієї додаткової невикористаної площі діаграми зношування.

Практична новизна одержаних результатів дисертаційної роботи:

– набув подальшого розвитку механізмів керованого локального зміцнення поверхневого шару в процесі формування регулярних мікрорельєфів. На основі отриманих регресійних багатофакторних моделей вперше кількісно оцінено можливості керування градієнтом мікротвердості: доведено, що шляхом зміни щільності розміщення канавок та швидкості їх формування досягається цілеспрямоване підвищення мікротвердості поверхні металу на дні западин (до 72,2% від початкового стану) та на вершинах пластичних напливів (до 54,1%);

– запропоновано новий метод формування регулярних мікрорельєфів на плоских поверхнях, що відрізняється накладанням додаткового високочастотного осциляційного руху перпендикулярно до напрямку подачі. Це рішення дозволяє збільшити мікротвердість поверхні.

4. Короткий аналіз основного змісту дисертації

У першому розділі дисертаційної роботи здійснено ґрунтовний аналіз умов експлуатації та причин виходу з ладу високонавантажених трибоспряжень, зокрема конусних дисків безступінчастих трансмісій (варіаторів) та деталей циліндро-поршневої групи. Доведено, що ключовим фактором руйнування робочих поверхонь є адгезійне схоплювання II роду, яке інтенсифікується під дією значних питомих тисків, температурних перевантажень та масляного голодування. На основі критичного огляду сучасних методів інженерії поверхні обґрунтовано робочу гіпотезу дослідження: цілеспрямоване формування регулярних мікрорельєфів (РМР) здатне ефективно запобігати появі задирів та значно підвищувати довговічність пар тертя.

Другий розділ присвячено теоретичному моделюванню кінематики формування мікрорельєфів методом вібраційного обкочування. Автором розроблено розрахункові схеми та виведено нові аналітичні залежності для визначення параметра оцінки поверхонь з регулярними мікрорельєфами – відносної площі мікрорельєфу. Створені математичні моделі дозволяють точно

розраховувати площу канавок для різних типів частково регулярних мікрорельєфів. Побудовані графічні залежності доводять, що на зміну відносної площі мікрорельєфу у більшій мірі впливають технологічні режими обробки (швидкість подачі та кількість подвійних ходів осцилятора), що дозволяє оптимізувати топографію ще на стадії проєктування технологічного процесу.

У третьому розділі викладено результати експериментальних досліджень впливу геометричних та технологічних параметрів при формуванні ЧРМР на стандартизовані показники шорсткості R_a, R_z, R_{ak2}, $R_{mc(25\%)}$ та параметр, що визначає експлуатаційну характеристику поверхні – її маслоємність. Експерименти, реалізовані на технологічному обладнанні із подальшим застосуванням методології дисперсійного аналізу ANOVA, дозволили отримати високоточні регресійні моделі. Встановлено фундаментальну закономірність: здатність поверхні утримувати мастило визначальним чином залежить від типу мікрорельєфу (при цьому I та III типи демонструють кращу комбінацію властивостей), тоді як швидкість подачі деформувального елемента здійснює найбільший вплив на висотні параметри мікронерівностей.

Четвертий розділ фокусується на вивченні фізико-механічних властивостей та структурно-фазових змін у поверхневому шарі на прикладі сталі AISI 304L. Експериментально доведено явище нерівномірного розподілу мікротвердості в околі деформованих канавок. Отримані регресійні рівняння підтверджують, що інтенсивність деформаційного зміцнення поверхні (наклепу) переважно керується величиною подачі інструменту. Виявлено, що найвищі показники мікротвердості як на виступах, так і на дні канавок забезпечує мікрорельєф III типу через щільне взаємне перекриття зон пластичної деформації. На завершення розділу наведено опис розробленого та захищеного патентом інноваційного способу формування регулярних мікрорельєфів вібраційним обкочуванням, що дозволяє уникнути проковзування інструмента.

5. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність

Достовірність та обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій у дисертації В.О. Семегена забезпечується правильним застосуванням методів теорії малих вибірок, а також використанням сучасних програмних комплексів для математичного й 3D-моделювання (MathCAD, SolidWorks, Statistika). Надійність результатів підтверджена грамотним плануванням експериментів та їх обробкою за допомогою багатофакторного дисперсійного аналізу ANOVA. Теоретичні викладки надійно верифіковані на 27 зразках із застосуванням 3- та 5-кратних повторних вимірювань (для різних серій експериментів), що довело високий ступінь збігу між розрахунковими даними та практичними показниками.

Запропоновані моделі та технологічні інновації є достовірними, що доводиться коректною методологією та даними натурних випробувань. Зокрема, виведення аналітичних формул для розрахунку відносної площі, перевірка регресійних рівнянь через дисперсійний аналіз та використання високоточних приладів та створюють міцне наукове підґрунтя для оптимізації процесів формування регулярних мікрорельєфів.

Високий рівень обґрунтованості результатів дослідження опирається на детальний аналіз існуючих технологій покращення експлуатаційних характеристик поверхонь і методів формування мікрорельєфів. Це дозволило чітко визначити завдання, застосувати передові підходи до вимірювання шорсткості, мікротвердості та маслоємності, а також зробити логічні та змістовні загальні висновки.

Усі висновки та рекомендації органічно випливають із результатів роботи. Успішна верифікація розроблених рішень доводить дієздатність запропонованої технології та її відповідність меті дослідження. Відтак, отримані практичні та теоретичні здобутки є повністю обґрунтованими і можуть бути рекомендовані для впровадження у виробництво з метою підвищення експлуатаційних показників деталей машин.

6. Практичні результати роботи

Практична цінність роботи Семегена В.О. полягає у створенні комплексної науково-технічної бази для підвищення експлуатаційних характеристик високонавантажених вузлів машин.

Розроблені автором технологічні рішення дозволяють запобігати виникненню небезпечних експлуатаційних дефектів, зокрема задирів та схоплювання металу у парах тертя, шляхом формування частково регулярних мікрорельєфів. Здобувачем запропоновано ефективну методику вибору раціональних режимів формування мікрорельєфу, за умови забезпечення обраних параметрів якості поверхні.

Практична значущість досліджень підтверджена впровадженням результатів на ТзОВ «Булат» (м. Тернопіль), інтеграцією розроблених методик в освітній процес на кафедрі автотранспорту та логістики Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. Таким чином, робота забезпечує можливість переходу до функціонально-орієнтованих технологічних процесів, які гарантують високі експлуатаційні властивості деталей машин ще на етапі їх виготовлення.

7. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладу наукових положень та результатів в опублікованих працях.

Структура дисертаційної роботи Семегена В.О. є логічною, послідовною та включає анотацію, вступ, чотири основні розділи, загальні висновки, список використаних джерел та додатки. Основний зміст роботи викладено на 113 сторінках друкованого тексту. Науковий апарат дослідження представлено 106 рисунками та 37 таблицями, які супроводжуються 14 додатками. Бібліографічний список складається зі 117 позицій, що відображають сучасний стан наукових напрацювань у цій предметній області. Оформлення дисертації повністю відповідає вимогам, затвердженим Наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 року № 40.

Зміст роботи свідчить про високу якість підготовки: основні висновки та рекомендації здобувача логічно випливають із результатів, отриманих у кожному з розділів дослідження. Слід підкреслити, що при написанні дисертації автором було повністю забезпечено дотримання норм академічної доброчесності. Перевірка тексту не виявила жодних неправомірних запозичень чи використання чужих результатів без належного посилання на джерела. Використання матеріалів інших науковців здійснено з неухильним дотриманням правил цитування та вимог наукової етики.

Результати проведеного дослідження ґрунтовно апробовані та висвітлені у 12 наукових публікаціях. Зокрема, автором опубліковано 3 статті у міжнародних журналах, що індексуються наукометричною базою Scopus (зокрема Q2, Q3), 2 статті у фахових наукових виданнях України категорії Б, а також 6 праць, представлених на наукових конференціях. Крім того, здобувачем отримано 1 патент України на корисну модель.

За своїми кількісними та якісними показниками, а також рівнем оприлюднення наукових результатів у рецензованих виданнях, які здійснюють належний контроль на предмет відсутності неправомірних запозичень, дисертаційна робота повністю відповідає критеріям Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії. Ключові наукові положення дисертації адекватно відображені в опублікованих працях автора. За підсумками детального аналізу дисертації Семегена В.О. фактів порушення академічної доброчесності не виявлено.

8. Мова та стиль дисертаційної роботи

Дисертація написана українською мовою з дотриманням усіх вимог наукового стилю. Матеріал викладено логічно та послідовно: кожний підрозділ органічно поєднується в загальну концепцію дослідження, забезпечуючи плавний перехід від теоретичної бази до експериментальної частини та практичного впровадження. Завдяки чітким формулюванням та коректному,

узгодженому використанню термінології текст легко й однозначно сприймається. Зміст роботи, її тема та отримані результати цілком відповідають паспорту спеціальності 131 «Прикладна механіка» (галузь знань 13 «Механічна інженерія»).

9. Зауваження до дисертації

1. У роботі детально досліджено мікроструктуру та мікротвердість, проте не наведено оцінку розподілу залишкових напружень (стискаючих або розтягуючих) у поверхневому шарі після вібраційного обкочування. Оскільки залишки напружень суттєво впливають на опір втомі та корозійну стійкість, їх аналіз (наприклад, рентгенодифракційним методом) був би важливим доповненням до характеристики якості поверхні.

2. Оскільки мікрорельєф призначений для високонавантажених пар тертя, було б доцільно дослідити зміну параметрів шорсткості безпосередньо в процесі припрацювання (наприклад, через кожні 10-50 годин роботи на машині тертя), щоб визначити швидкість «спрацювання» мікронерівностей поверхні.

3. Робота зосереджена на топографії поверхні, проте не враховано взаємодію мікрорельєфу з різними типами мастил (наприклад, їх в'язкісно-температурними характеристиками). Ефективність масляних кишень може суттєво змінюватися залежно від в'язкості мастила при робочих температурах, що могло б бути предметом окремого моделювання.

4. У роботі розглядається формування мікрорельєфу на плоских зразках, закріплених на столі верстата. Однак при перенесенні цієї технології на реальні деталі (наприклад, конусні диски варіатора) виникає питання впливу похибки базування та жорсткості кріплення деталі на стабільність глибини канавок, що не було детально проаналізовано.

5. Пластична деформація, що виникає при обкочуванні, створює стискаючі напруження, але водночас може призвести до мікротріщин у поверхневому шарі. У роботі бракує оцінки впливу сформованого рельєфу на опір багатоцикловій втомі матеріалу AISI 304L, що є критичним для високонавантажених деталей.

Висновок про дисертаційну роботу

Дисертаційне дослідження В. О. Семегена на тему «Забезпечення параметрів якості при формуванні частково регулярних мікрорельєфів на плоских поверхнях» є цілісною науковою працею високого рівня, у якій дотримано всіх стандартів академічної доброчесності. Комплекс представлених теоретичних і практичних напрацювань вирішує актуальну наукову проблему забезпечення параметрів якості поверхонь з регулярними мікрорельєфами. Завдання вирішено шляхом вибору оптимальних геометричних параметрів мікрорельєфу та режимів його формування.

Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6-9 «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.

Здобувач Семеген Володимир Олегович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 «Прикладна механіка».

Офіційний опонент,
доцент кафедри виробництва, ремонту та матеріалознавства
Національного транспортного університету
доктор філософії **Ілля РИБАК**

ПІДПИС ЗАСВІДЧУЮ
Учений секретар Національного
транспортного університету
Олександр ІВАНУШКО
«16» 07 2026 р.