

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

*Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису*

Потоскаєв Олексій Миколайович

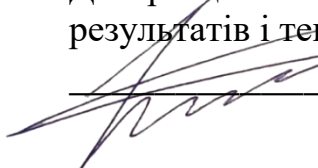
УДК 621.822.6.004.67: 668.3: 631.3.02

ДИСЕРТАЦІЯ

**РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ОТВОРІВ У КОРПУСНИХ
ДЕТАЛЯХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ
НАНОКОМПОЗИТНИМИ МАТЕРІАЛАМИ**

Спеціальність: 133 «Галузеве машинобудування»
Галузь знань 13 «Механічна інженерія»
Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


_____ О.М. Потоскаєв

Науковий керівник – Сайчук Олександр Васильович, доктор технічних наук,
професор

Полтава - 2026

АНОТАЦІЯ

***Потоскаєв О.М.* Розробка технології відновлення отворів у корпусних деталях сільськогосподарської техніки нанокompозитними матеріалами – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» (13 – Механічна інженерія) – Полтавський державний аграрний університет, Полтава, 2026.

Дисертаційна робота присвячена пошуку шляхів розв'язання науково-прикладної задачі підвищення ресурсу корпусних деталей сільськогосподарської техніки шляхом розроблення нанокompозитного матеріалу на основі еластомеру Ф-40 та технології відновлення посадкових отворів під підшипники кочення. Актуальність теми зумовлена високою часткою корпусних деталей у структурі витрат на ремонт машинно-тракторного парку (до 25–30 % загальних витрат) та локальним характером їх пошкоджень, що робить доцільним саме відновлення, а не виготовлення нових корпусів. Використання традиційних полімерних композитів стримується їх низькою теплопровідністю, недостатньою термостійкістю та обмеженою адгезією до металевих основ, що погіршує тепловий стан і довговічність відновлених підшипникових вузлів.

Метою роботи є підвищення довговічності та поліпшення теплового стану посадок підшипників кочення в корпусних деталях сільськогосподарської техніки шляхом розроблення та наукового обґрунтування технології відновлення отворів нанокompозитом на основі еластомеру Ф-40, наповненого металевими наночастинками. Для досягнення поставленої мети послідовно вирішено комплекс задач: проаналізовано структуру дефектності корпусних деталей і характер пошкодження посадок «корпус – підшипник»; узагальнено досвід застосування полімерних композитів у відновленні отворів; обґрунтовано вибір еластомеру Ф-40 як матриці та металевих нанонаповнювачів; досліджено деформаційно-міцнісні, адгезійні та теплофізичні властивості нанокompозиту; розроблено математичні

моделі, що описують роботу матеріалу в умовах експлуатаційних навантажень; сформовано раціональні параметри технологічного процесу відновлення та підтверджено його ефективність експериментально й виробничими випробуваннями.

Об'єктом дослідження є плівки, покриття та відновлені посадки типу «корпус – підшипник кочення», сформовані на поверхні отворів корпусних деталей за допомогою нанокompозиту на основі еластомеру Ф-40. Предметом дослідження виступають деформаційно-міцнісні, адгезійні та теплофізичні характеристики створеного нанокompозиту, закономірності формування напружено-деформованого стану й теплового поля у відновлених посадках, а також довговічність підшипникових вузлів за умов реальної експлуатації сільськогосподарської техніки.

Методологічною основою роботи є положення інженерного матеріалознавства, теорії міцності й довговічності матеріалів, теорії теплопровідності та механіки руйнування в поєднанні з загальними принципами надійності машин і системним підходом до аналізу технічних об'єктів. Використано теоретичний аналіз наукових публікацій, стандартів та нормативних документів, стандартизовані методики випробувань полімерів (на розтяг, стиск, згин, зсув, відрив) і адгезійних з'єднань «полімер – метал», методики визначення теплостійкості, термостійкості, теплопровідності та температуропровідності полімерних і композиційних матеріалів. Для опису впливу структури композиту і режимів навантаження застосовано регресійний аналіз, багатофакторне планування експерименту й розрахунково-експериментальне моделювання теплового стану підшипникових вузлів, відновлених нанокompозитом.

Наукова новизна отриманих результатів.

- Вперше теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість істотного підвищення теплопровідності, теплостійкості та довговічності полімерних покриттів посадок підшипників

кочення за рахунок введення в еластомерну матрицю Ф-40 металевих наночастинок алюмінію та міді;

- Запропоновано та розвинено регресійні моделі, які пов'язують питому роботу руйнування плівок нанокompозиту, показники міцності й адгезії з концентрацією нанонаповнювачів, параметрами структури та режимами термовпливу;

- Уточнено уявлення про закономірності зміни коефіцієнтів старіння за міцністю та відносним подовженням для нанонаповнених еластомерів у порівнянні з вихідною полімерною матрицею, що дозволило кількісно оцінити зростання термостійкості композиту в 1,8 рази за міцністю та в 1,4 рази за деформацією;

- Розвинуто підходи до моделювання теплового стану підшипникових вузлів з урахуванням підвищеної теплопровідності нанокompозитного шару, що забезпечує більш рівномірний розподіл температури в зоні контакту «корпус – підшипник».

Практичне значення роботи полягає у створенні нового нанокompозиту на основі еластомеру Ф-40 складу: 100 мас. ч. еластомеру, 2,0 мас. ч. нанопорошку алюмінію та 1,6 мас. ч. нанопорошку міді, який забезпечує підвищення адгезійної міцності до сталі з 3310 до 9560 Н/м, зростання теплопровідності з 0,56 до 21,8 Вт/(м·К) (у 38,9 рази) та підвищення умовної теплостійкості з ≈ 100 до ≈ 123 °С. Розроблено технологію відновлення посадкових отворів корпусних деталей нанокompозитом Ф-40 + Al + Cu, яка дозволяє відновлювати посадки підшипників при діаметральному зносі до 0,25 мм, забезпечує зниження температури деталей підшипникового вузла до 16 °С у порівнянні з ненаповненими полімерними вкладками та досягає річного економічного ефекту близько 160 тис. грн на одному ремонтному підприємстві. Технологію апробовано у виробничих умовах, підтверджено відсутність випадків передчасного руйнування відновлених посадок підшипників та зменшення витрат на ремонт корпусних деталей.

Особистий внесок здобувача полягає в постановці та деталізації наукової задачі, формуванні програми досліджень, розробленні складу нанокompозиту, проведенні більшості експериментів з визначення деформаційно-міцнісних, адгезійних та теплофізичних характеристик матеріалу, обробці експериментальних даних і побудові регресійних моделей, участі у створенні технології відновлення отворів та її виробничій перевірці, інтерпретації результатів і формулюванні висновків. Окремі елементи методичного забезпечення й експериментального обладнання виконані за участю наукового керівника та співвиконавців, про що зазначено у співавторських публікаціях.

Робота пов'язана з науковими програмами, планами та темами кафедри механічної та електричної інженерії Полтавського державного аграрного університету, спрямованими на підвищення надійності машинно-тракторного парку та розвиток ресурсозберігаючих технологій ремонту техніки агропромислового комплексу. Отримані результати увійшли до виконання комплексних тем з дослідження й впровадження прогресивних способів відновлення сільськогосподарських машин, а також використовуються в навчальному процесі при викладанні дисциплін, пов'язаних з технічним сервісом, технологією ремонту та нанотехнологіями в машинобудуванні.

Апробація результатів дослідження здійснювалася на науково-практичних конференціях різного рівня, де обговорювалися питання застосування еластомерних нанокompозитів у технічному сервісі, моделювання теплового стану підшипникових вузлів, оптимізації технологічного оснащення для відновлення отворів корпусних деталей. Основні положення дисертації доповідалися на профільних заходах, присвячених проблемам підвищення надійності сільськогосподарської техніки та ефективності ремонтного виробництва.

За темою дисертації опубліковано наукові праці, серед яких статті у фахових виданнях України та тези доповідей на вітчизняних і міжнародних конференціях. У цих публікаціях висвітлено формування властивостей

нанокомпозиту на основі Ф-40, результати дослідження його деформаційно-міцнісних, адгезійних і теплофізичних характеристик, моделі роботи відновлених посадок підшипників, а також технологію відновлення отворів корпусних деталей і результати її впровадження.

Удосконалено: методи контролю якості нанокомпозитних полімерних покриттів для відновлення посадкових отворів корпусних деталей, що передбачають комплексну оцінку їхньої мікроструктури, деформаційно-міцнісних, адгезійних, трибологічних та теплофізичних характеристик. Запропоновано поєднання випробувань на міцність і тріщиностійкість плівок, адгезії до сталевих основи, мікротвердості, зносостійкості, теплостійкості, термостійкості в умовах ОДКВ, а також аналізу теплового балансу вузла «корпусна деталь – підшипник» для всебічної оцінки працездатності отриманих покриттів.

Отримало подальший розвиток: підхід до адаптації та оптимізації технології відновлення посадкових отворів корпусних деталей сільськогосподарської техніки нанокомпозитними матеріалами на основі еластомеру Ф-40, модифікованого нанопорошками алюмінію та міді. Розроблено рекомендації щодо вибору складу нанокомпозиту, товщини відновлювального шару, геометрії ріжучого інструменту та режимів калібрування залежно від рівня зносу, умов навантаження та теплового режиму підшипникового вузла, а також методику ресурсної та техніко-економічної оцінки доцільності застосування розробленої технології.

Структурно дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 258 сторінок машинописного тексту, у тому числі 82 рисунки, 47 таблиць і 63 формули, а також 8 додатків, що містять експериментальні матеріали, акти впровадження та допоміжні дані, які відображають етапи розроблення нанокомпозитного матеріалу, результати досліджень і практичні рекомендації щодо впровадження запропонованої технології відновлення корпусних деталей сільськогосподарської техніки.

Ключові слова: нанокompозитні матеріали, еластомер Ф-40, нанопорошки алюмінію та міді, полімерні покриття, відновлення посадкових отворів, корпусні деталі, підшипникові вузли, адгезія, деформаційно-міцнісні властивості, теплостійкість, термостійкість, теплопровідність, тепловий баланс, мікротвердість, зносостійкість, ресурс відновлених посадок, оптимізація складу нанокompозиту, технологічні параметри відновлення, регресійне моделювання, економічна ефективність, впровадження у ремонтне виробництво.

ABSTRACT

Potoskaev O.M. Development of technology for restoring holes in agricultural machinery body parts using nanocomposite materials – Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the speciality 133 «Industrial Engineering» (13 – Mechanical Engineering) – Poltava State Agrarian University, Poltava, 2026.

The dissertation is devoted to finding ways to solve the scientific and applied problem of increasing the service life of agricultural machinery body parts by developing a nanocomposite material based on elastomer F-40 and a technology for restoring bearing seats for rolling bearings. The relevance of the topic is due to the high proportion of body parts in the structure of repair costs for the machine and tractor fleet (up to 25–30% of total costs) and the local nature of their damage, which makes it expedient to restore rather than manufacture new bodies. The use of traditional polymer composites is limited by their low thermal conductivity, insufficient heat resistance and limited adhesion to metal substrates, which worsens the thermal condition and durability of the restored bearing assemblies.

The aim of the work is to increase the durability and improve the thermal condition of rolling bearing seats in the housing parts of agricultural machinery by developing and scientifically substantiating the technology for restoring holes with a nanocomposite based on elastomer F-40 filled with metal nanoparticles. To achieve this goal, a set of tasks was solved in sequence: the structure of defects in housing parts and the nature of damage to ‘housing-bearing’ fits were analysed; the experience of using polymer composites in hole restoration was summarised; the choice of elastomer F-40 as a matrix and metal nanofillers was justified; the deformation-strength, adhesion and thermophysical properties of the nanocomposite were investigated; mathematical models describing the behaviour of the material under operating loads were developed; rational parameters for the restoration process were established and its effectiveness was confirmed by experimental and production tests.

The object of the study is films, coatings and restored 'housing-rolling bearing' type fittings formed on the surface of housing parts holes using a nanocomposite based on elastomer F-40. The subject of the study is the deformation-strength, adhesion and thermophysical characteristics of the created nanocomposite, the patterns of formation of the stress-strain state and thermal field in the restored fits, as well as the durability of bearing assemblies under real operating conditions of agricultural machinery.

The methodological basis of the work is the provisions of engineering materials science, the theory of strength and durability of materials, the theory of thermal conductivity and fracture mechanics in combination with the general principles of machine reliability and a systematic approach to the analysis of technical objects. Theoretical analysis of scientific publications, standards and regulatory documents, standardised methods for testing polymers (for tension, compression, bending, shear, tear) and polymer-metal adhesive joints, methods for determining the heat resistance, thermal stability, thermal conductivity and temperature conductivity of polymer and composite materials. Regression analysis, multifactorial experimental design and computational and experimental modelling of the thermal state of bearing assemblies restored with nanocomposite were used to describe the influence of the composite structure and loading modes.

Scientific novelty of the results obtained.

- For the first time, the possibility of significantly increasing the thermal conductivity, heat resistance and durability of polymer coatings of rolling bearing seats by introducing metal nanoparticles of aluminium and copper into the elastomeric matrix F-40 has been theoretically substantiated and experimentally confirmed.

- Regression models have been proposed and developed that link the specific work of destruction of nanocomposite films, strength and adhesion indicators with the concentration of nanofillers, structural parameters and thermal impact modes.

- The understanding of the patterns of change in ageing coefficients in terms of strength and relative elongation for nano-filled elastomers compared to the

original polymer matrix has been refined, which has made it possible to quantitatively estimate the increase in the thermal stability of the composite by 1.8 times in terms of strength and 1.4 times in terms of deformation.

- Approaches to modelling the thermal state of bearing assemblies have been developed, taking into account the increased thermal conductivity of the nanocomposite layer, which ensures a more uniform temperature distribution in the 'housing-bearing' contact zone.

The practical significance of the work lies in the creation of a new nanocomposite based on elastomer F-40 with the following composition: 100 mass parts of elastomer, 2.0 mass parts of aluminium nanopowder and 1.6 mass parts of copper nanopowder, which provides an increase in adhesive strength to steel from 3310 to 9560 N/m, an increase in thermal conductivity from 0.56 to 21.8 W/(m·K) (38.9 times) and an increase in conditional heat resistance from ≈ 100 to ≈ 123 °C. A technology has been developed for restoring the mounting holes of housing parts with F-40 + Al + Cu nanocomposite, which allows restoring bearing seats with diametrical wear up to 0.25 mm, reduces the temperature of bearing assembly parts to 16 °C compared to unfilled polymer inserts and achieves an annual economic effect of about 160 thousand UAH per repair enterprise. The technology has been tested in production conditions, confirming the absence of cases of premature destruction of restored bearing seats and a reduction in the cost of repairing housing parts.

The applicant's personal contribution consists in setting and detailing the scientific task, forming the research programme, developing the composition of the nanocomposite, conducting most of the experiments to determine the deformation-strength, adhesion and thermophysical characteristics of the material, processing the experimental data and constructing regression models, participating in the creation of a hole restoration technology and its production testing, interpreting the results, and formulating conclusions. Some elements of the methodological support and experimental equipment were developed with the participation of the scientific supervisor and co-authors, as indicated in the co-authored publications.

The work is related to scientific programmes, plans and topics of the Department of Mechanical and Electrical Engineering of Poltava State Agrarian University, aimed at improving the reliability of the machine and tractor fleet and developing resource-saving technologies for repairing agricultural machinery. The results obtained were included in the implementation of comprehensive topics on the research and introduction of progressive methods for the restoration of agricultural machinery, and are also used in the educational process when teaching disciplines related to technical service, repair technology and nanotechnologies in mechanical engineering.

The results of the research were tested at scientific and practical conferences of various levels, where issues related to the use of elastomeric nanocomposites in technical service, modelling of the thermal state of bearing assemblies, and optimisation of technological equipment for restoring holes in body parts were discussed. The main provisions of the dissertation were reported at specialised events dedicated to the problems of improving the reliability of agricultural machinery and the efficiency of repair production.

Scientific works have been published on the topic of the dissertation, including articles in professional publications in Ukraine and abstracts of reports at domestic and international conferences. These publications highlight the formation of the properties of the F-40-based nanocomposite, the results of research into its deformation-strength, adhesion and thermophysical characteristics, models of the operation of restored bearing seats, as well as the technology for restoring holes in body parts and the results of its implementation.

Improved: methods for quality control of nanocomposite polymer coatings for restoring the mounting holes of housing parts, which provide for a comprehensive assessment of their microstructure, deformation-strength, adhesion, tribological and thermophysical characteristics. A combination of tests for the strength and crack resistance of films, adhesion to a steel base, microhardness, wear resistance, heat resistance, thermal stability under ODC conditions, as well as analysis of the heat

balance of the ‘housing part – bearing’ assembly for a comprehensive assessment of the performance of the coatings obtained.

Further development: approach to adaptation and optimisation of technology for restoring mounting holes in agricultural machinery body parts using nanocomposite materials based on elastomer F-40 modified with aluminium and copper nanopowders. Recommendations have been developed for selecting the composition of the nanocomposite, the thickness of the restoration layer, the geometry of the cutting tool and the calibration modes depending on the level of wear, load conditions and thermal regime of the bearing assembly, as well as a methodology for resource and technical-economic assessment of the feasibility of applying the developed technology.

Structurally, the dissertation consists of an introduction, five chapters, general conclusions, a list of references, and appendices. The total volume of the dissertation comprises 258 pages of typewritten text, including 82 figures, 47 tables, and 63 equations, as well as 8 appendices containing experimental materials, implementation acts, and supplementary data that reflect the stages of development of the nanocomposite material, the results of the research, and practical recommendations for the implementation of the proposed technology for restoring housing parts of agricultural machinery.

Keywords: nanocomposite materials, elastomer F-40, aluminium and copper nanopowders, polymer coatings, restoration of mounting holes, housing parts, bearing assemblies, adhesion, deformation and strength properties, heat resistance, thermal stability, thermal conductivity, heat balance, microhardness, wear resistance, service life of restored seats, optimisation of nanocomposite composition, restoration process parameters, regression modelling, economic efficiency, implementation in repair production.

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові публікації, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

Наукові праці, опубліковані у фахових наукових виданнях України

1. Rybalko I. M., Saychuk O. V., Zakharov A. V., Potoskaev O. M. Electroslag surface of product surfaces with composite wear-resistant alloy. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes*. 2022. No 2(48). P. 61-65. (фахове видання категорії Б) <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.9>

2. Потоскаєв О.М. Самопоширюваний високотемпературний синтез як спосіб отримання композиційних матеріалів для підвищення довговічності ножів подрібнювача-розкидача соломи. Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». 2023. №19. С. 1-11. <https://www.inter-nauka.com/uploads/public/17018427627213.pdf>

3. Сайчук О.В., Потоскаєв О.М. Підвищення довговічності деталей сільськогосподарської техніки із застосуванням наноструктурного беміту. Науковий журнал «Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки». 2024. Том 35 (74) № 2. С. 1-5. https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2024/2_2024/2_2024.pdf

4. Сайчук О.В., Потоскаєв О.М. Особливості застосування полімерних композиційних матеріалів при відновлення підшипникових гнізд корпусних деталей. Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського. 2024. №1. С. 190-195. https://visnikkrmu.kdu.edu.ua/statti/2024_1_190.pdf

Тези доповідей на конференціях

1. Рибалко І.М., Захаров А.В., Потоскаєв О.М. Особливості технології електрошлакового наплавлення. *Молодь: наука та інновації: матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 23–25 листопада 2022 року /*

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2022. С. 490- 491.

2. Потоскаєв О.М. Обґрунтування вибору наповнювачів еластомерів, призначених для відновлення корпусних деталей. *Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування: матеріали V Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції (Полтава, 21-22 лютого 2023 р.)*. Полтава: ПДАУ, 2023. С. 122-126.

3. Потоскаєв О.М. Відновлення посадкових отворів корпусних деталей полімерними матеріалами. *Молодь індустрія 4.0 в XXI столітті: матеріали XIX Міжнародний форум молоді (Харків, 6-7 квітня 2023 р.)* Харків: ДБУ, 2023. С. 141.

4. Сайчук О.В., Захаров А.В., Потоскаєв О.М., Боровик О.Ю. Вплив властивостей абразивних частинок на зносостійкість деталей сільськогосподарської ґрунтообробної техніки. *5-а міжнародна науково-технічна конференція «Інтелектуальні транспортні технології»*, Харків, 25–27 листопада 2024 р.: Тези доповідей. Харків: УкрДУЗТ, 2024. С. 299-301.

5. Потоскаєв О.М., Сайчук О.В. Сучасні тенденції у застосуванні нанокompозитів для машинобудування. Актуальні проблеми сучасної науки: теоретичні та практичні дослідження молодих учених: *Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції*. м. Полтава, 14-15 квітня 2025 р. Полтава, 2025. С. 144-145.

6. Потоскаєв О.М. Методика дослідження вибору матеріалів для відновлення посадкових отворів в сільськогосподарській техніці. The XXII International scientific and practical conference «Scientific trends in the development of modern technologies», June 02-04, 2025, Krakow, Poland. 2025. С. 243-244. <https://eu-conf.com/en/events/scientific-trends-in-the-development-of-modern-technologies/>

7. Потоскаєв О.М. Технологічні основи застосування наноматеріалів при відновленні деталей машин. Collection of Scientific Papers with the Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference «Global

Trends in Science: Research, Innovation and Development» (June 23-25, 2025. Varna, Bulgaria). European Open Science Space, 2025.C. 266-270.

8. Потоскаєв О. удосконалення та ефективність при відновлені корпусних деталей сільськогосподарської техніки нанокompозитними матеріалами. Collection of Scientific Papers with the Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference «Evolving Science: Theories, Discoveries and Practical Outcomes» (June 9-11, 2025. Zurich, Switzerland). European Open Science Space, 2025.C. 430-436.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ABSTRACT	8
ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	13
ВСТУП	20
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ВІДНОВЛЕННЯ ОТВОРІВ У КОРПУСНИХ ДЕТАЛЯХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ	33
1.1. Значення корпусних деталей у забезпеченні працездатності машинно- тракторного парку	33
1.2. Характер та причини пошкодження посадок підшипників кочення в корпусних деталях.....	36
1.3. Способи відновлення отворів у корпусних деталях та передумови застосування нанокompозитних матеріалів.....	40
1.4. Фізико-хімічні основи будови та експлуатаційних властивостей еластомерної матриці Ф-40 для нанокompозитів функціонального призначення.....	45
1.5. Теоретичні засади та математичне моделювання теплопровідності й теплого стану підшипникових вузлів із нанокompозитним прошарком на основі Ф-40.....	49
1.6. Невирішені наукові та прикладні проблеми відновлення посадкових отворів корпусних деталей нанокompозитами на основі Ф-40 та постановка задач дисертаційного дослідження.....	54
Висновки до розділу 1	58
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ НАНОКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ	61
2.1. Фізико-механічні властивості нанокompозитних матеріалів	61
2.2. Деформаційно-міцнісні характеристики полімерних покриттів	68
2.2.1. Діаграма деформування та енергомісткість руйнування полімерних покриттів.....	69

2.2.2. Модуль пружності, зсувний модуль і жорсткість тонкого покриття.....	70
2.2.3. Адгезійна і когезійна міцність як складові деформаційно-міцнісного комплексу.....	72
2.2.4 Термодеструкція, термостійкість та втомне руйнування покриттів.....	73
2.2.5 Узагальнена роль деформаційно-міцнісних характеристик у забезпеченні ресурсу відновлених вузлів.....	75
2.3 Адгезійні та трибологічні властивості матеріалів для відновлення деталей.....	76
2.3.1. Адгезійна взаємодія «полімерне покриття – металевий корпус»	77
2.3.2. Вплив теплофізичних властивостей на адгезію та трибологічну поведінку.....	79
2.3.3. Трибологічна поведінка полімерних і нанокompозитних покриттів у вузлах «корпус – підшипник».....	81
2.3.4 Узагальнена оцінка адгезійних і трибологічних переваг нанокompозиту на основі Ф-40	83
2.4. Тепло- та термостійкість, теплопровідність нанокompозитів	84
2.4.1. Поняття теплостійкості та термостійкості полімерних нанокompозитів.....	85
2.4.2. Експериментальна оцінка теплостійкості та термостійкості нанокompозиту на основі Ф-40.....	87
2.4.3 Теплопровідність нанокompозитів та механізми її підвищення.....	88
2.4.4 Вплив теплофізичних властивостей нанокompозиту на тепловий стан вузла «корпус – підшипник».....	90
2.4.5 Взаємозв’язок теплофізичних характеристик із довговічністю відновлених посадок	91
2.5. Вплив нанорозмірних наповнювачів на експлуатаційні властивості покриттів.....	93
2.5.1. Структурні особливості наномодифікованого покриття та базові механізми впливу наповнювачів.....	93

2.5.2. Багатофакторна оптимізація складу нанокompозиту та характер впливу вмісту наночастинок.....	94
2.5.3. Зміна комплексу експлуатаційних характеристик під дією нанонаповнювачів.....	96
2.5.4. Вплив нанорозмірних наповнювачів на технологічну пошкоджуваність та точність покриттів.....	98
2.5.5. Вплив нанорозмірних наповнювачів на довговічність відновлених посадок підшипників.....	100
2.6. Теоретичне моделювання процесу відновлення посадкових отворів	101
2.6.1. Постановка задачі моделювання та прийняті припущення.....	102
2.6.2. Ефективні механічні характеристики нанокompозиту в системі «корпус – підшипник».....	104
2.6.3. Модель напружено-деформованого стану трьохшарової циліндричної системи з натягом.....	105
2.6.4. Моделювання теплопровідності та теплового стану відновленої посадки.....	107
2.6.5. Теоретичне моделювання процесу калібрування отворів з нанокompозитним покриттям.....	108
2.6.6. Узагальнена модель та аналіз впливу параметрів на довговічність посадок.....	109
Висновки до розділу 2	111
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАНОКОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ЕЛАСТОМЕРУ Ф-40 ТА ВІДНОВЛЕНИХ ПОСАДОК ПІДШИПНИКІВ	115
3.1. Вибір матеріалів для відновлення посадкових отворів	115
3.1.1. Обґрунтування вибору еластомерної матриці Ф-40.....	117
3.2. Методика дослідження механічних та фізичних властивостей нанокompозитів.....	121
3.2.1. Номенклатура показників і загальна схема експерименту.....	122

3.2.2. Підготовка зразків нанокompозиту на основі еластомеру Ф-40.....	123
3.2.3. Методика визначення деформаційно-міцнісних характеристик плівок.....	124
3.2.4. Методика визначення адгезійної міцності покриттів.....	126
3.2.5. Методика визначення теплостійкості й теплопровідності.....	126
3.2.6. Методика визначення термостійкості за коефіцієнтами старіння.....	127
3.3. Оцінка адгезії та довговічності з'єднання «корпусна деталь – підшипник».....	128
3.4 Вплив геометричних параметрів ріжучого інструменту на якість відновлення.....	135
3.4.1 Теоретичні передумови вибору геометрії калібру-різця.....	135
3.4.2 Вплив переднього кута на зусилля різання покриття.....	136
3.4.3 Пошкоджуваність покриття при різних значеннях переднього кута.....	137
3.4.4 Вплив геометрії інструменту на точність отворів з полімерним покриттям.....	139
3.4.5. Раціональні геометричні параметри калібру-різця та їх вплив на якість відновлення.....	141
3.5. Методика визначення теплового балансу відновлених посадок.....	142
3.6. Обладнання та методи випробувань, аналіз отриманих результатів.....	149
Висновки до розділу 3	157
РОЗДІЛ 4. ВПЛИВ СКЛАДУ НАНОКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЯКІСТЬ ВІДНОВЛЕННЯ ПОСАДОК ПІДШИПНИКІВ	161
4.1. Вплив складу нанокompозиту Ф-40 + Al + Cu на фізико-механічні та теплофізичні властивості покриттів	161
4.2. Дослідження довговічності відновлених отворів корпусних деталей	165

4.2.1. Результати стендових випробувань ресурсної витривалості посадок ..	166
4.2.2. Вплив товщини нанокompозитного шару та натягів на довговічність вузла	169
4.3. Аналіз термостійкості, теплопровідності та міцності відновлених з'єднань.....	172
4.3.1. Порівняння теплового стану вузлів з еластомером Ф-40 та нанокompозитом	174
4.3.2. Вплив теплопровідності нанокompозиту на температурний режим і напружений стан	176
4.4. Оптимізація складу нанокompозитних матеріалів	179
4.4.1. Побудова регресійних моделей залежності властивостей від складу нанокompозиту	179
4.4.2. Визначення області раціональних концентрацій нанонаповнювачів...	183
4.5. Оптимізація технологічних параметрів процесу відновлення посадкових отворів	186
4.5.1. Регресійні моделі впливу режимів калібрування на якість відновлених отворів	187
4.5.2. Вибір раціональних натягів і товщини нанокompозитного шару	190
4.6. Узагальнення результатів досліджень	194
Висновки до розділу 4	196
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ОТВОРІВ У КОРПУСНИХ ДЕТАЛЯХ НАНОКОМПОЗИТНИМИ МАТЕРІАЛАМИ.....	199
5.1. Обґрунтування вибору методу нанесення нанокompозитного покриття та технології відновлення посадок.....	199
5.2. Технологічні рекомендації щодо застосування нанокompозиту на основі еластомеру Ф-40 у ремонтному виробництві.....	202
5.3. Випробування розробленої технології та техніко-економічна ефективність відновлення корпусних деталей.....	205

5.4. Впровадження результатів досліджень у виробництво та сервісні структури аграрного сектору.....	209
Висновки до розділу 5	211
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	215
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	222
ДОДАТКИ	241

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Ефективність функціонування агропромислового комплексу значною мірою визначається технічним станом і надійністю машинно-тракторного парку, а також технологічного обладнання, що використовується для обробки ґрунту, посіву, догляду за посівами та збирання врожаю. Значні обсяги робіт, сезонний характер навантажень, складні умови експлуатації (пил, волога, перепади температур, ударні навантаження) зумовлюють інтенсивний знос деталей машин, особливо тих, що працюють у вузлах обертання й кочення. Вихід з ладу таких вузлів спричиняє не лише прямі витрати на ремонт, а й непрямі втрати від простоїв техніки у відповідальні періоди сільськогосподарських кампаній.

Особливе місце серед елементів сільськогосподарських машин займають корпусні деталі – корпуси редукторів, підшипникові щити, корпуси вузлів трансмісій, опорні корпуси різноманітних агрегатів. Вони є матеріаломісткими, складними у виготовленні, потребують високої точності обробки та використання якісних конструкційних матеріалів. При цьому реальне вибраковування таких деталей найчастіше пов'язане не з повним виснаженням їхнього ресурсу, а з локальним зносом або пошкодженням посадкових отворів під підшипники кочення. Основна ж маса металу, а також геометрія й жорсткість корпусу в цілому залишаються достатніми для подальшої роботи після усунення локальних дефектів.

Виготовлення нових корпусних деталей потребує значних затрат металу, енергоресурсів та праці, тоді як їх відновлення дає змогу зекономити до 20–30 разів металу порівняно з виготовленням нових деталей, скоротити обсяги металургійного виробництва, зменшити енерговитрати та негативний вплив на довкілля. Тому відновлення корпусних деталей є одним із найбільш ефективних напрямів ресурсозбереження в технічному сервісі машин.

Традиційні способи відновлення посадок підшипників кочення (наплавлення, напилення, постановка втулок, розточування під ремонтні

розміри) часто супроводжуються значним тепловим впливом на деталь, зміною структури базового матеріалу, залишковими деформаціями та необхідністю проведення складних технологічних операцій. Це не лише ускладнює процес ремонту, а й не завжди забезпечує потрібну точність відновленої посадки та її довговічність. У разі застосування традиційних металевих покриттів виникають проблеми контактної втоми, зносостійкості, корозійної стійкості та сумісності з мастильними матеріалами.

У цих умовах значного поширення набули полімерні композиційні матеріали, що використовуються для відновлення посадок підшипників кочення. Їх застосування дає змогу уникнути високотемпературних технологічних процесів, знизити вимоги до обладнання, забезпечити можливість ремонту безпосередньо у виробничих умовах (у тому числі в ремонтних майстернях та на базі господарств). Полімерні композиції характеризуються високою адгезією до металів, хорошою вібро- й ударостійкістю, можливістю «самовирівнювання» при формуванні шару. Однак класичні полімери мають низьку теплопровідність і обмежену теплостійкість, що у випадку підшипникових вузлів призводить до підвищення температури зони контакту, прискорення деградації мастильних матеріалів та передчасного виходу вузлів із ладу.

Одним із перспективних шляхів усунення цих недоліків є створення нанокompозитних матеріалів на основі еластомерів із введенням металевих нанопоповнювачів. Металеві наночастинки, завдяки своїй високій теплопровідності, великій питомій поверхні та здатності формувати у полімерній матриці теплопровідні канали, дозволяють значно підвищити тепловідвід від підшипника до корпусної деталі, а отже – покращити тепловий режим вузла й продовжити його ресурс. Одночасно нанопоповнювачі здатні змінювати модуль пружності, міцність, тріщиностійкість і адгезійні властивості полімеру.

Разом із тим аналіз літератури та матеріалів дисертаційних досліджень показує, що питання раціонального вибору типу й концентрації металевих

нанопоповнювачів, методів їх введення в еластомерну матрицю, забезпечення однорідності структури нанокомпозиту, а також побудови математичних моделей, які описують взаємозв'язок між складом і властивостями матеріалу, залишаються розробленими недостатньо. Недостатньо вивченими є й питання, пов'язані з технологією відновлення отворів корпусних деталей саме нанокомпозитними матеріалами, зокрема технологія формування покриттів, режими термовпливу, особливості механічної обробки (калібрування) та їхній вплив на якість і довговічність посадок.

З огляду на це розробка технології відновлення отворів у корпусних деталях сільськогосподарської техніки нанокомпозитними матеріалами на основі еластомеру Ф-40 з металевими нанопоповнювачами є логічно обґрунтованим і своєчасним напрямом досліджень. Обрана тема поєднує в собі важливі наукові аспекти (створення й дослідження нових нанокомпозитних матеріалів) та практичні потреби аграрної галузі (підвищення ресурсу техніки та зниження витрат на ремонт), що й зумовило вибір теми дисертаційної роботи.

Мета дослідження – підвищення ефективності відновлення отворів у корпусних деталях сільськогосподарської техніки шляхом розроблення та впровадження технології застосування нанокомпозитних матеріалів на основі еластомеру Ф-40 з металевими нанопоповнювачами, які забезпечують покращені деформаційно-міцнісні, адгезійні та теплофізичні характеристики відновлювальних покриттів і підвищену довговічність посадок підшипників кочення.

Для досягнення поставленої мети вирішували наступні задачі: для реалізації поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно було вирішити комплекс взаємопов'язаних завдань, що охоплюють аналітичні, теоретичні, експериментальні та прикладні аспекти:

1. Провести систематизований аналіз сучасних методів відновлення корпусних деталей і посадок підшипників кочення, зокрема із застосуванням полімерних та композиційних матеріалів; узагальнити досвід використання

еластомерів та нанокompозитів у ремонтних технологіях; виявити невирішені проблеми й суперечності, які стримують широке впровадження таких технологій у практику технічного сервісу.

2. Обґрунтувати вибір еластомеру Ф-40 як базового полімерного матеріалу для відновлення отворів у корпусних деталях; визначити перелік перспективних металевих нанопоповнювачів, зокрема за їх теплофізичними, механічними й адгезійними характеристиками, та побудувати концептуальну схему формування нанокompозиту.

3. Розробити склад нанокompозитного матеріалу на основі еластомеру Ф-40 з металевими наночастинками; встановити регресійні залежності деформаційно-міцнісних характеристик, питомої роботи руйнування й адгезійної міцності від вмісту нанопоповнювачів; визначити оптимальний склад нанокompозиту за комплексом критеріїв.

4. Дослідити теплостійкість, термостійкість, теплопровідність і температуропровідність розробленого нанокompозиту в порівнянні з ненаповненим еластомером Ф-40; встановити закономірності впливу складу, структури та режимів термовпливу на теплофізичні характеристики матеріалу.

5. Розробити технологію формування нанокompозитних покриттів у посадкових отворах корпусних деталей, що включає підготовку поверхні, нанесення, витримку, термообробку та калібрування; визначити раціональні параметри кожної операції з урахуванням забезпечення необхідної точності та якості поверхні.

6. Дослідити вплив геометричних параметрів ріжучої кромки калібру-різця (кути загострення, радіус заокруглення, мікрогеометрія) та режимів різання на зусилля різання, пошкоджуваність покриття й точність відновлених отворів; обґрунтувати раціональні параметри інструмента й режимів обробки нанокompозитних покриттів.

7. Провести комплексні випробування довговічності, жорсткості та теплового режиму посадок підшипників кочення, відновлених нанокompозитом на основі еластомеру Ф-40; порівняти одержані показники з

традиційними способами відновлення та оцінити вплив нового матеріалу на ресурс вузла.

8. Виконати техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження розробленої технології відновлення отворів у корпусних деталях із застосуванням нанокompозитних матеріалів у ремонтні служби аграрних підприємств і сервісні центри, визначити економічний ефект та термін окупності.

Об'єкт дослідження: процеси відновлення отворів у корпусних деталях сільськогосподарської техніки та робота посадок підшипників кочення, сформованих із використанням нанокompозитних матеріалів на основі еластомеру Ф-40.

Предмет дослідження:

- деформаційно-міцнісні, адгезійні, теплофізичні та експлуатаційні характеристики нанокompозитного матеріалу на основі еластомеру Ф-40 з металевими нанопоповнювачами;
- закономірності формування та руйнування нанокompозитних покриттів у отворах корпусних деталей;
- параметри технологічного процесу відновлення отворів, включно з підготовкою поверхні, нанесенням, витримкою, термообробкою та калібруванням;
- вплив геометрії ріжучого інструмента й режимів обробки на якість і точність відновлених отворів;
- довговічність і тепловий стан посадок підшипників кочення, відновлених розробленим нанокompозитом.

Методи дослідження. Методологічною основою дослідження є положення інженерного матеріалознавства, теорії міцності та довговічності матеріалів, теорії теплопровідності, механіки руйнування, а також загальні принципи надійності машин і методологія системного аналізу.

У роботі застосовано:

- теоретичний аналіз та узагальнення публікацій, дисертацій, стандартів і нормативних документів, що стосуються відновлення деталей, застосування полімерних композитів і нанокompозитів, а також експлуатаційної надійності машин;
- стандартизовані методики механічних випробувань полімерних матеріалів (на розтяг, стиск, згин, зсув, відрив), з використанням випробувальних машин для визначення модулів пружності, меж міцності, відносних деформацій, питомої роботи руйнування;
- експериментальні методи оцінювання адгезійної міцності «полімер – метал» при різних режимах підготовки поверхні та умовах тверднення матеріалу;
- методики визначення теплостійкості, термостійкості, теплопровідності та температуропровідності полімерних і композитних матеріалів, зокрема на основі вимірювання температурних градієнтів і часу прогріву зразків до граничних станів;
- методи математичного планування експерименту та регресійного аналізу для побудови багатофакторних моделей, що описують вплив складу нанокompозиту та технологічних факторів на його властивості й експлуатаційні показники;
- машинні випробування відновлених підшипникових вузлів на спеціалізованих стендах для оцінювання їхньої довговічності, жорсткості, теплового режиму та характеру руйнування;
- методи техніко-економічного аналізу для визначення собівартості відновлення, економії металу, скорочення простоїв техніки й терміну окупності впровадження розробленої технології.

Наукова новизна отриманих результатів

Вперше:

- розроблено нанокompозитний матеріал на основі еластомеру Ф-40, наповнений металевими наночастинками, призначений для відновлення отворів у корпусних деталях сільськогосподарської техніки; встановлено

закономірності впливу типу та концентрації нанонаповнювачів на деформаційно-міцнісні, адгезійні та теплофізичні характеристики матеріалу;

- отримано регресійні моделі, що описують залежності питомої роботи руйнування, міцності й інших показників нанокompозиту від складу й умов формування, що дає змогу обґрунтовано визначати оптимальний склад нанокompозиту за комплексом експлуатаційних критеріїв;

- комплексно досліджено тепловий баланс посадок підшипників кочення, відновлених нанокompозитом на основі еластомеру Ф-40, і показано, що підвищення теплопровідності відновлювального шару сприяє покращенню температурного режиму роботи вузла та збільшенню його довговічності.

Удосконалено:

- теоретичні уявлення про взаємозв'язок між складом нанокompозитних еластомерних матеріалів, характеристиками міжфазної взаємодії «полімер – метал» та сукупністю деформаційно-міцнісних і теплофізичних властивостей матеріалу, який застосовується для відновлення посадок підшипників кочення;

- методичні підходи до оцінювання пошкоджуваності нанокompозитних покриттів при їх механічній обробці; встановлено вплив геометричних параметрів ріжучої кромки калібру-різця на глибину та характер пошкоджень, а також точність відновлених отворів;

- наукові уявлення про структурно-експлуатаційні особливості посадок підшипників кочення, відновлених полімерними нанокompозитами, з урахуванням спільної дії силових і теплових навантажень;

- методику техніко-економічної оцінки технологій відновлення корпусних деталей, що враховує не лише прямі витрати на ремонт, а й зміну ресурсу вузлів, зменшення простоїв техніки та економію матеріальних ресурсів.

Практичне значення отриманих результатів. Практичне значення одержаних у дисертаційній роботі результатів полягає в тому, що:

- створено й експериментально випробувано нанокompозитний матеріал на основі еластомеру Ф-40 з металевими наночастинками, який може використовуватися для відновлення отворів у корпусних деталях сільськогосподарської техніки та інших машин, забезпечуючи підвищену міцність, адгезію й теплопровідність відновлювальних покриттів;

- розроблено технологічний процес відновлення отворів у корпусних деталях, що включає підготовку поверхні, нанесення нанокompозиту, його витримку, термообробку, калібрування та контроль якості; технологія адаптована до умов ремонтних підприємств різного рівня технічного оснащення;

- розроблено конструкцію та раціональні параметри калібрувального інструмента для механічної обробки нанокompозитних покриттів, що забезпечують мінімальне порушення поверхневого шару й потрібну точність отворів;

- на основі стендових і виробничих випробувань показано, що використання розробленого нанокompозиту для відновлення посадок підшипників кочення дозволяє збільшити ресурс вузлів та скоротити кількість відмов, пов'язаних із деградацією посадок;

- виконано техніко-економічну оцінку, яка підтвердила, що впровадження розробленої технології забезпечує суттєве зниження витрат на ремонт корпусних деталей за рахунок відмови від виготовлення нових деталей, скорочення простоїв техніки й зменшення обсягу металоспоживання.

Отримані результати можуть бути використані при розробленні нормативних документів і методичних рекомендацій з технічного сервісу сільськогосподарської техніки, у діяльності ремонтних і сервісних підприємств, а також у навчальному процесі закладів вищої освіти технічного профілю.

Особистий внесок здобувача. Усі основні наукові результати, викладені в дисертації, отримані автором особисто. Особистий внесок здобувача полягає у:

- постановці мети й завдань дослідження, формулюванні наукової гіпотези та виборі напрямів досліджень;
- проведенні аналітичного огляду літератури з проблеми відновлення корпусних деталей, застосування полімерних і нанокompозитних матеріалів, узагальненні та критичній оцінці відомих рішень;
- розробленні складу нанокompозиту на основі еластомеру Ф-40, визначенні типів і концентрацій металевих наноаповнювачів, обґрунтуванні параметрів їх введення у полімерну матрицю;
- розробленні й удосконаленні методик експериментальних досліджень механічних, адгезійних і теплофізичних властивостей нанокompозиту, а також довговічності й теплового режиму відновлених посадок;
- виготовленні й випробуванні зразків нанокompозитів, обробці та інтерпретації експериментальних даних, побудові регресійних моделей і встановленні закономірностей;
- розробленні технологічного процесу відновлення отворів у корпусних деталях нанокompозитом, у тому числі виборі схеми формування покриттів, режимів термообробки, параметрів калібрувального інструмента;
- виконанні техніко-економічних розрахунків, підготовці пропозицій щодо впровадження результатів дослідження у виробництво;
- підготовці наукових публікацій, матеріалів доповідей на конференціях, а також написанні основного тексту дисертації та автореферату.

У співавторських роботах здобувачеві належить провідна роль у постановці задач, проведенні експериментів і аналізі результатів за тематикою дисертації; внесок інших співавторів полягав у науковому консультуванні, участі в постановці окремих експериментів і обговоренні результатів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана в межах наукових досліджень кафедри механічної та електричної інженерії Полтавського державного аграрного університету й узгоджена з планами науково-дослідних робіт, присвячених

підвищенню ефективності технічного сервісу машин і обладнання агропромислового комплексу, розробленню ресурсозберігаючих технологій ремонту та відновлення деталей.

Тематика дисертації відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки й техніки у галузі аграрної інженерії, зокрема щодо впровадження нанокompозитних матеріалів у машинобудуванні, удосконалення методів відновлення й зміцнення деталей машин, зниження матеріало- й енергоємності ремонтних процесів, підвищення надійності технічних систем.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи апробовано на міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференціях, форумах і семінарах, що підтверджується публікаціями тез доповідей та сертифікатами учасника:

- X Міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Молодь: наука та інновації» (Дніпро, 2022 р.) – доповідь щодо особливостей технології електрошлакового наплавлення та формування зносостійких покриттів, що пов'язано з тематикою відновлення деталей;
- V Всеукраїнська науково-практична Інтернет-конференція «Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування» (Полтава, 2023 р.) – представлено результати з обґрунтування вибору наповнювачів еластомерів, призначених для відновлення корпусних деталей;
- XIX Міжнародний форум молоді «Молодь – індустрія 4.0 в XXI столітті» (Харків, 2023 р.) – доповідь на тему відновлення посадкових отворів корпусних деталей полімерними матеріалами;
- 5-та міжнародна науково-технічна конференція «Інтелектуальні транспортні технології» (Харків, 2024 р.) – доповідь щодо впливу властивостей абразивних частинок на зносостійкість деталей ґрунтообробної техніки, що узгоджується з проблематикою довговічності деталей;
- III Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні проблеми сучасної науки: теоретичні та практичні дослідження молодих

учених» (Полтава, 2025 р.) – доповідь про сучасні тенденції у застосуванні нанокompозитів для машинобудування;

- XXII International scientific and practical conference «Scientific trends in the development of modern technologies» (Krakow, Poland, 2025) – доповідь про методику дослідження вибору матеріалів для відновлення посадкових отворів у сільськогосподарській техніці;

- 1st International Scientific and Practical Conference «Global Trends in Science: Research, Innovation and Development» (Varna, Bulgaria, 2025) – доповідь щодо технологічних основ застосування наноматеріалів при відновленні деталей машин;

- 4th International Scientific and Practical Conference «Evolving Science: Theories, Discoveries and Practical Outcomes» (Zurich, Switzerland, 2025) – доповідь про удосконалення та ефективність при відновленні корпусних деталей сільськогосподарської техніки нанокompозитними матеріалами.

Апробація результатів на вказаних заходах сприяла уточненню окремих положень дисертації, отриманню фахових рекомендацій і зауважень, які були враховані при завершенні роботи.

Публікації. За темою дисертації опубліковано фахові статті та тези доповідей, які відображають основні результати дослідження.

Статті у фахових виданнях України (4):

1. Rybalko I. M., Saychuk O. V., Zakharov A. V., Potoskaev O. M. *Electroslag surface of product surfaces with composite wear-resistant alloy*. Bulletin of Sumy National Agrarian University. Series: Mechanization and Automation of Production Processes. 2022. No 2(48). P. 61–65. (фахове видання категорії Б).

2. Потоскаєв О. М. *Самопоширюваний високотемпературний синтез як спосіб отримання композиційних матеріалів для підвищення довговічності ножів подрібнювача-розкидача соломи*. Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». 2023. №19. С. 1–11.

3. Сайчук О. В., Потоскаєв О. М. *Підвищення довговічності деталей сільськогосподарської техніки із застосуванням наноструктурного беміту*. «Вчені записки ТНУ ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки». 2024. Т. 35 (74), №2. С. 1–5.

4. Сайчук О. В., Потоскаєв О. М. *Особливості застосування полімерних композиційних матеріалів при відновленні підшипникових гнізд корпусних деталей*. Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського. 2024. №1. С. 190–195.

Ці публікації висвітлюють окремі аспекти дисертаційної тематики – від отримання зносостійких композиційних матеріалів та наноструктурованих фаз до особливостей застосування полімерних композицій при відновленні корпусних деталей.

Тези доповідей на конференціях (8): – перелік наведено вище в розділі «Апробація результатів дисертації», де відображено участь у міжнародних і всеукраїнських заходах у 2022–2025 рр.

У сукупності публікації підтверджують повноту викладення основних результатів дисертаційної роботи, їх апробацію та відповідність вимогам до дисертаційних досліджень.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота «Розробка технології відновлення отворів у корпусних деталях сільськогосподарської техніки нанокompозитними матеріалами» складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

У першому розділі наведено аналітичний огляд сучасних матеріалів і технологій відновлення корпусних деталей та посадок підшипників кочення, розглянуто можливості застосування полімерних і нанокompозитних матеріалів, проаналізовано їхні переваги й недоліки.

У другому розділі викладено теоретичні основи формування властивостей нанокompозиту на основі еластомеру Ф-40 з металевими нанонаповнювачами, обґрунтовано вибір наповнювачів, побудовано моделі,

що описують їх вплив на деформаційно-міцнісні та теплофізичні характеристики матеріалу.

У третьому розділі описано матеріали, методики та план експериментальних досліджень нанокompозиту й відновлених отворів, наведено схеми випробувань, параметри експериментального обладнання й методи статистичної обробки результатів.

У четвертому розділі подано результати експериментальних досліджень деформаційно-міцнісних, адгезійних і теплофізичних властивостей нанокompозиту, характеристик відновлених отворів і посадок підшипників кочення, наведено їх аналіз, узагальнення та порівняння з традиційними матеріалами й технологіями.

У п'ятому розділі сформовано технологію відновлення отворів у корпусних деталях нанокompозитним матеріалом на основі еластомеру Ф-40, наведено результати виробничих випробувань і техніко-економічну оцінку доцільності її впровадження.

Загальний обсяг дисертації становить близько 258 сторінок машинописного тексту, включаючи 82 рисунки, 47 таблиць і 63 формули. Список використаних джерел містить 140 найменувань.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ВІДНОВЛЕННЯ ОТВОРІВ У КОРПУСНИХ ДЕТАЛЯХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ

1.1. Значення корпусних деталей у забезпеченні працездатності машинно-тракторного парку

Машинно-тракторний парк сільськогосподарських підприємств є однією з ключових ланок технічного потенціалу аграрного виробництва. Саме від технічного стану тракторів, ґрунтообробних машин, посівних комплексів, збиральних агрегатів і транспортних засобів залежить своєчасність виконання всіх елементів технології вирощування культур, дотримання оптимальних агротехнічних строків і, як наслідок, рівень урожайності та собівартості продукції [1–3]. Будь-які відхилення в роботі машинно-тракторного парку у періоди пікових навантажень (посів, догляд, збирання) призводять до прямих втрат урожаю й опосередкованих втрат, пов'язаних зі зростанням витрат пального, мастильних матеріалів і запасних частин.

За даними економічних розрахунків і ремонтної статистики витрати на технічне обслуговування й ремонт машинно-тракторного парку становлять 25–40 % загальних експлуатаційних витрат, причому до 60 % цієї суми припадає на заміну або відновлення деталей і вузлів [2, 4, 5]. Іншими словами, кожна друга-третя гривня, вкладена в експлуатацію машин, спрямовується не на виконання виробничих операцій, а на підтримання техніки в працездатному стані. У структурі цих витрат особливе місце посідають корпусні деталі, які у більшості машин є найбільш матеріаломісткими й технологічно складними елементами.

Корпусні деталі (корпуси редукторів, картери, корпуси мостів, підшипникові щити, корпуси опор робочих органів тощо) виконують функції несучих елементів і водночас забезпечують просторову фіксацію валів, зубчастих коліс, підшипників кочення, зубчастих і фрикційних з'єднань [6–8]. Вони сприймають комплекс статичних, динамічних і ударних навантажень, формують внутрішні порожнини для мастильних матеріалів, забезпечують

герметичність та захист внутрішніх елементів від пилу, вологи й агресивних середовищ. Від точності взаємного розташування отворів, базових площин і посадок у корпусних деталях залежить кінематична точність механізмів, рівень шуму й вібрацій, рівномірність розподілу навантажень по елементах підшипників та зубчастих колесах, а отже – і ресурс вузлів та агрегатів [7, 9].

Вартість виготовлення корпусних деталей у ряді вузлів досягає 10–20 % від вартості всього агрегату [10, 7, 9]. Це пов'язано з необхідністю виготовлення складної ливарної або зварно-ливої заготовки, застосуванням високоякісних конструкційних чавунів і сталей, виконанням кількох етапів термічної й механічної обробки з високими вимогами до точності. При цьому результати аналізу причин вибракування корпусів свідчать, що у переважній більшості випадків вони втрачають працездатність не через повне вичерпання ресурсу матеріалу чи руйнування несучого каркаса, а через локальні пошкодження посадкових отворів під підшипники кочення – знос, розроблення, овальність, конусність, корозійні ураження та тріщини в зоні посадок [9–11]. Фактично мова йде про використання корпусу «всього життя деталі» через дефект, зосереджений у відносно невеликому об'ємі металу.

Економічна доцільність відновлення корпусів замість їхньої заміни новими підтверджується різними дослідженнями. Застосування методів відновлення корпусних деталей дозволяє зменшити витрати металу у 20–30 разів порівняно з виготовленням нових корпусів, скоротити енерговитрати в заготівельно-металургійному циклі на 70–80 %, знизити собівартість ремонту агрегатів на 30–50 % та істотно зменшити тривалість простою техніки [4, 7, 13]. Узагальнену орієнтовну структуру витрат на ремонт вузлів машинно-тракторного парку наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Орієнтовна структура витрат на ремонт вузлів машинно-тракторного парку

Група деталей / вузлів	Частка від загальних витрат на ремонт, %
Корпусні деталі (корпуси, щити, картери)	25–30

1.1 Продовження таблиці

Вали, осі, півосі	10–15
Підшипники кочення	15–20
Зубчасті колеса	10–15
Інші деталі та вузли	20–30

Графічно ці співвідношення зручно подати у вигляді кругової діаграми (рис. 1.1), на якій сектор, що відповідає корпусним деталям, займає приблизно чверть або третину загальної площі. Така діаграма дозволяє наочно показати, що кожен відновлений корпус замість виготовлення нового дає відчутну економію.



Рисунок 1.1 – Структура витрат на ремонт вузлів машинно-тракторного парку

З економічної точки зору ефект від упровадження прогресивної технології відновлення корпусних деталей можна описати у спрощеному вигляді формулою

$$E = (C_{\text{нов}} - C_{\text{відн}}) N - \Delta Z_{\text{експл}} \quad (1)$$

де $C_{\text{нов}}$ – витрати на виготовлення та установку нового корпусу;

$C_{\text{відн}}$ – витрати на відновлення корпусу;

N – кількість корпусів, що відновлюються за рік;

$\Delta Z_{\text{експл}}$ – зміна експлуатаційних витрат у результаті підвищення (або зниження) довговічності відновлених вузлів.

За результатами впровадження нової технології відновлення посадок корпусних деталей наноккомпозитом на основі еластомеру Ф-40 на одному з підприємств річний економічний ефект становив близько 360 тис. грн., що підтверджує значущість обраного напрямку ресурсозбереження.

Отже, корпусні деталі є однією з найважливіших складових машинно-тракторного парку за впливом на надійність і економічність машин. Їх висока вартість, порівняно локальний характер пошкоджень і значний потенціал відновлення обумовлюють актуальність розроблення прогресивних технологій ремонту, орієнтованих насамперед на відновлення посадкових отворів під підшипники кочення, що й визначає подальшу логіку досліджень.

1.2. Характер та причини пошкодження посадок підшипників кочення в корпусних деталях

Підшипникові вузли сільськогосподарських машин працюють у складних комбінованих умовах: навантаження в них мають змінний характер, часто перевищують розрахункові значення через перевантаження машин, удари й вібрації, діють у середовищі пилу, вологи, агресивних реагентів ґрунту та добрив. Унаслідок цього підшипники кочення й корпусні деталі, в яких вони встановлені, одночасно піддаються механічному, корозійному, абразивному та тепловому впливам [14, 9, 12]. Стан посадок зовнішніх кілець підшипників у корпусах визначає не лише кінематичну точність і вібраційний фон вузла, але й умови тепловідводу, оскільки тепло, що виділяється в зоні контакту елементів кочення з доріжками, значною мірою передається саме через зовнішнє кільце до корпусу.

У процесі тривалої експлуатації під дією циклічних навантажень, мікропровертання кілець підшипників і мікровідносних переміщень у зоні контактних пар «кільце – корпус» відбувається поступове руйнування мікронерівностей, виникають умови для фретинг-корозії й абразивного зносу. При перевантаженнях і порушенні монтажних натягів зовнішнє кільце може почати провертатися в корпусі, що призводить до інтенсивного розроблення

отвору, виривання металу з поверхні та розвитку дефектів, систематизованих у табл. 1.2. Одночасно корпусна деталь, особливо якщо вона виконана з чавуну, схильна до утворення втомних тріщин у зонах концентраторів напружень – поблизу різких переходів перерізу, литих і механічних дефектів, корозійних раковин [15–16].

Таблиця 1.2 – Основні види дефектів посадок підшипників кочення в корпусних деталях

Вид дефекту посадки	Типові причини виникнення	Наслідки для вузла
Збільшення діаметра (розроблення)	Перевантаження, повертання кільця, недостатній натяг, знос	Втрата натягу, люфти, зростання вібрацій
Овальність отвору	Нерівномірні навантаження, деформації корпусу, помилки монтажу	Локальні зони підвищеного тиску, нерівномірний знос
Конусність отвору	Помилки обробки, деформації під час ремонту чи експлуатації	Ускладнений монтаж, непередбачуваний натяг
Зміщення осі отвору	Пластичні деформації, ударні навантаження, тріщини	Перекося валів, підвищені динамічні навантаження
Виривання металу в зоні посадки	Інтенсивне повертання зовнішнього кільця, надмалі натяги	Різде ослаблення фіксації, аварійний характер відмов
Корозійний знос посадкової поверхні	Волога, агресивні середовища, порушення герметичності	Раковини, пітинг, концентрація напружень
Тріщини в зоні посадки або в тілі корпусу	Втомні та ударні навантаження, локальні концентратори напружень	Ризик раптового руйнування корпусної деталі

З механічної точки зору збільшення діаметра отвору, поява овальності та конусності означають зміну реального контакту «зовнішнє кільце – отвір корпусу» із замиканням навантаження на окремі ділянки та появою зон підвищеного тиску. Це призводить до нерівномірного розподілу навантаження по елементах кочення, що кульково-роликові підшипники сприймають

особливо чутливо. Унаслідок цього у частині доріжки кочення виникають перевантажені зони, де контактні напруження перевищують допустимі, прискорюється розвиток втомних тріщин і пітингу, а ресурс підшипника істотно зменшується [16, 18, 9].

Експериментальні дані, отримані різними авторами, показують, що навіть порівняно невелике збільшення радіального зазору в посадці (на 20–30 % від номінального) призводить до зменшення ресурсу підшипникового вузла до 0,7–0,8 від базового значення, а при зростанні зазору на 50 % ресурс може знизитися до 0,4–0,5. Цю залежність умовно відображено на рис. 1.2 у вигляді спадної кривої. На початковій ділянці крива зменшується порівняно плавно, але після досягнення певного критичного значення зазору спостерігається різке падіння ресурсу, що відповідає переходу вузла до режиму прогресуючого зносу й нестійкої роботи [19] .

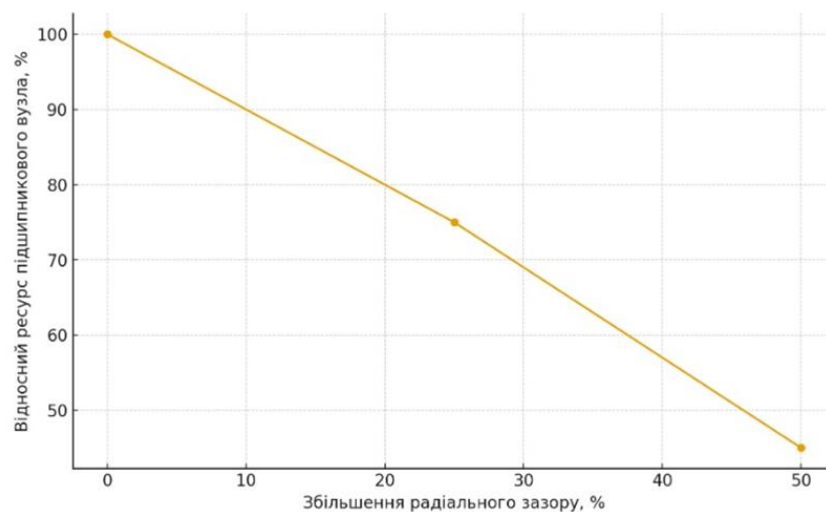


Рисунок 1.2 – Вплив збільшення радіального зазору в посадці на відносний ресурс підшипникового вузла

Окрім силового фактора важливим є тепловий аспект роботи підшипникових вузлів. Теплова потужність, що виділяється у вузлі, залежить від навантаження, швидкості обертання, типу мастила та умов охолодження. У спрощеному вигляді питому теплову потужність можна записати як:

$$\dot{Q} = \mu P v, \quad (2)$$

де μ – коефіцієнт тертя;

P – навантаження на підшипник;

v – відносна швидкість кочення/ковзання.

У нормально змонтованому вузлі з металевими посадками значна частина тепла відводиться через зовнішнє кільце підшипника до корпусу, а далі – до навколишнього середовища. Якщо посадка відновлена полімерним або еластомерним матеріалом із низькою теплопровідністю, тепловий потік, що відводиться, зменшується. Згідно з законом теплопровідності Фур'є:

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{\delta}, \quad (3)$$

де q – густина теплового потоку;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу;

δ – товщина шару;

ΔT – перепад температур,

полімер з малим λ при однаковій товщині шару обмежує тепловий потік, що призводить до підвищення температури в зоні контакту. Таким чином, при оцінюванні стану посадок, відновлених полімерними матеріалами, необхідно враховувати не лише геометричні параметри, але й теплофізичні властивості матеріалу відновлювального шару [20-22] .

На практиці дослідження теплового стану підшипникових вузлів із полімерними та нанокompозитними посадками виконувалися на спеціальних вібростендах, де вузол навантажувався циклічним радіальним навантаженням до 20 кН, а температури зовнішнього кільця підшипника та втулки корпусу вимірювались інфрачервоним пірометром при різних значеннях навантаження 9,9; 15,8 та 20,0 кН.

Такі експерименти показали, що за рахунок підвищення теплопровідності матеріалу посадки можна істотно знизити робочу температуру підшипникового вузла й підвищити його довговічність.

Таким чином, характер і причини пошкодження посадок підшипників кочення в корпусних деталях мають комплексний механіко-тепловий характер. Звідси випливає, що технологія відновлення отворів має

забезпечувати не лише відновлення геометричних параметрів і натягу, а й сприятливі умови розподілу навантажень і тепловідводу. Це вимагає детального аналізу існуючих способів відновлення й властивостей матеріалів, що застосовуються для формування відновлювальних шарів.

1.3. Способи відновлення отворів у корпусних деталях та передумови застосування нанокompозитних матеріалів

Технології відновлення отворів у корпусних деталях сільськогосподарської техніки розвивалися по декількох основних напрямках: механічному (розточування під ремонтний розмір, втулкування), зварювально-наплавному (дугове, газотермічне, плазмове наплавлення та напилення), гальванічному (електролітичні покриття) і полімерному (застосування клеїв, герметиків, композиційних полімерних матеріалів) [24, 20-22, 2, 9]. Кожен із цих напрямків має свої переваги й обмеження, що визначають сферу його раціонального використання.

Механічні методи (розточування під ремонтний розмір, установлення втулок) забезпечують високу точність геометрії, але обмежують кількість можливих ремонтів і не покращують умов роботи вузла з точки зору вібрацій і тепловідводу. Зварювання й наплавлення дозволяють відновлювати значні дефекти металу, але супроводжуються великим тепловим впливом, зміною структури металу корпусу та появою залишкових напружень, що ускладнює забезпечення необхідної точності й може приводити до тріщиноутворення [25, 21, 8]. Гальванічні покриття придатні для корекції невеликих відхилень розмірів, але обмежені по товщині, вимагають спеціального обладнання й суворого дотримання екологічних норм.

Полімерні композиційні матеріали, які в останні десятиліття активно впроваджуються у ремонтну практику, мають низку суттєвих технологічних переваг. Їх застосування не потребує високотемпературних операцій, дозволяє уникнути деформацій корпусу, забезпечує високий рівень адгезії до металу та можливість виконання відновлювальних операцій без демонтажу

крупногабаритних вузлів [26–28, 22-24]. Еластомери та інші полімерні матриці здатні демпфувати вібрації, частково компенсувати неточності приготування, формувати «м'який» контакт, що позитивно позначається на розподілі навантажень у підшипниковому вузлі.

Разом з тим полімерні композити є теплоізоляційними матеріалами, їх коефіцієнт теплопровідності зазвичай не перевищує 0,2–0,6 Вт/(м·К), тоді як для сталей і чавунів він становить десятки Вт/(м·К). Це означає, що заміна металевої посадки на полімерну без спеціальних заходів з підвищення теплопровідності може призвести до погіршення теплового режиму вузла. Для вирішення цієї суперечності запропоновано використовувати наноструктуровані композити, у яких полімерна або еластомерна матриця наповнюється малими кількостями (як правило, до 5 мас. %) металевих або оксидних наночастинок [29]. Такі наночастинки, завдяки великій питомій поверхні й особливостям міжфазної взаємодії, здатні істотно змінювати механічні, трибологічні й теплофізичні властивості композиту.

Для еластомеру Ф-40, який застосовується для відновлення посадок підшипників у корпусних деталях, було розроблено нанокompозит на його основі з наповнювачем у вигляді нанопорошків алюмінію та міді. Оптимальний склад нанокompозиту становить: розчин еластомеру Ф-40 – 100 мас. ч., нанопорошок алюмінію – 2,0 мас. ч., нанопорошок міді – 1,6 мас. ч.

Саме цей склад забезпечує максимальні деформаційно-міцнісні та адгезійні властивості: адгезія покриття до металу досягає 9560 Н/м, що більш ніж у 2,8 рази перевищує показник ненаповненого еластомеру Ф-40 (3310 Н/м).

На рисунку 1.3 схематично показано порівняння адгезійних характеристик покриттів на основі еластомеру Ф-40 без наповнювачів і нанокompозиту на його основі.

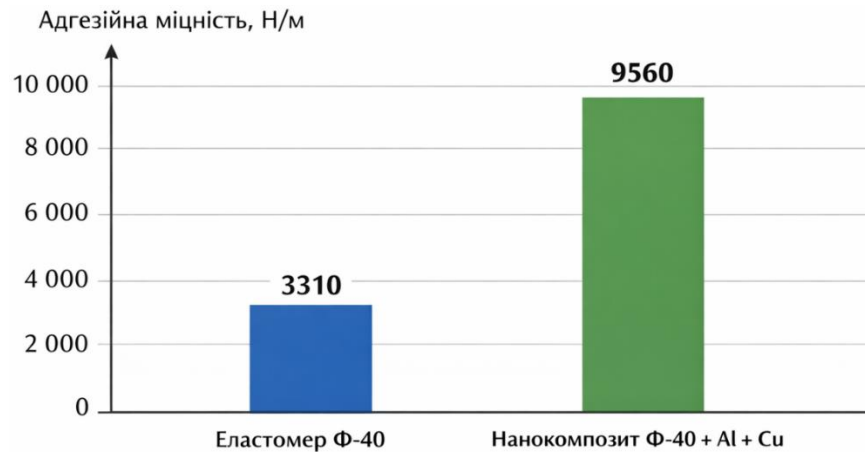


Рисунок 1.3 – Порівняння адгезії до металевої основи еластомеру Ф-40 та наноккомпозиту на його основі

Окрім покращення адгезії, наноккомпозит на основі еластомеру Ф-40 характеризується значним підвищенням теплостійкості й теплопровідності. Теплостійкість ненаповненого еластомеру Ф-40 становить близько 100 °С, тоді як при наповненні нанопорошками міді й алюмінію вона зростає в 1,23 рази і досягає 123 °С.

Коефіцієнт теплопровідності еластомеру Ф-40 дорівнює 0,56 Вт/(м·К), а для наноккомпозиту на його основі – 21,8 Вт/(м·К), що означає зростання теплопровідності у 38,9 рази. Ці дані узагальнено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Порівняння теплофізичних властивостей еластомеру Ф-40 та наноккомпозиту на його основі

Показник	Еластомер Ф-40	Наноккомпозит на основі Ф-40
Теплостійкість, °С	100	123
Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К)	0,56	21,8
Зростання λ порівняно з Ф-40	–	у 38,9 рази

Графічно вплив нанонаповнення на теплопровідність можна уявити у вигляді стовпчикової діаграми (рис. 1.4), де для ненаповненого еластомеру наведений відносно низький рівень λ , а для наноккомпозиту – значно вищий, наближений до показників металевих матеріалів. Такий розподіл наочно

демонструє, що наноккомпозит на основі Ф-40 за здатністю до тепловідведення займає проміжне положення між полімером і металом [30-32].

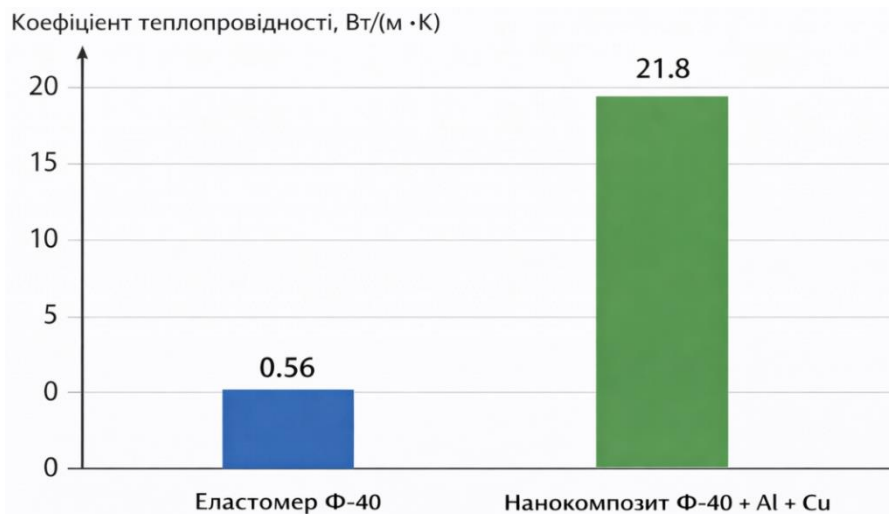


Рисунок 1.4 – Порівняння коефіцієнтів теплопровідності еластомеру Ф-40 та наноккомпозиту на його основі

Додатково досліджено термостійкість матеріалів за показниками старіння по міцності та відносному подовженню. Виявлено, що коефіцієнти старіння наноккомпозиту за умовною міцністю в 1,8 рази, а за відносним подовженням – у 1,4 рази вищі, ніж у ненаповненого еластомеру Ф-40, що підтверджує більш високу термостійкість та стабільність властивостей наноккомпозиту при тривалому впливі підвищених температур.

На рисунку 1.5 схематично показано зміну коефіцієнтів старіння K_{σ} і K_{ϵ} для обох матеріалів у часі.

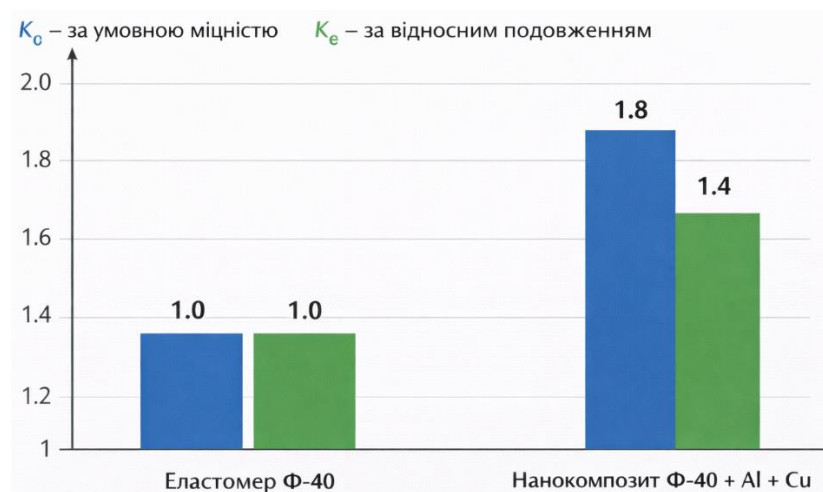


Рисунок 1.5 – Коефіцієнти старіння за умовною міцністю K_{σ} та відносним подовженням K_{ϵ} еластомеру Ф-40 та наноккомпозиту на його основі

Ключовими з точки зору застосування нанокompозиту в посадках підшипників є результати стендових випробувань довговічності та теплового балансу. Випробування проводилися на вібростенді за бази $5,76 \times 10^7$ циклів навантаження (330 год роботи), при циклічному радіальному навантаженні до 20 кН. Визначено, що максимальна допустима товщина покриття еластомеру Ф-40 становить 0,10 мм, тоді як для нанокompозиту на його основі цей показник може досягати 0,125 мм без суттєвого зниження довговічності.

Водночас нанокompозитом на основі еластомеру Ф-40 рекомендується відновлювати корпусні деталі з діаметральним зносом посадкових отворів під підшипники до 0,25 мм.

На рисунку 1.6 у вигляді графіка показано типову залежність ресурсу полімерних посадок підшипника від товщини полімерного покриття. Крива для еластомеру Ф-40 має більш крутий спад при зростанні товщини шару, тоді як крива нанокompозиту характеризується меншою крутизною, що свідчить про більш високу витривалість матеріалу при однаковій товщині шару.

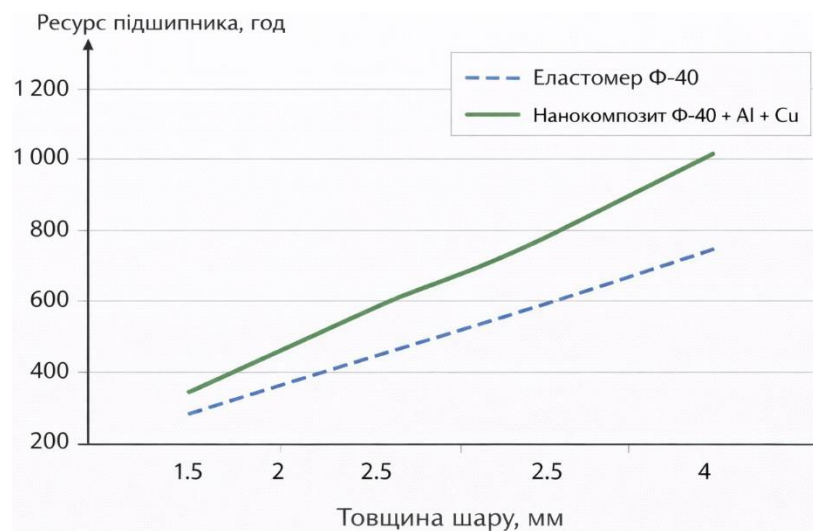


Рисунок 1.6 – Ресурс полімерних посадок підшипника залежно від товщини шару еластомеру Ф-40 та нанокompозиту на його основі

Важливо підкреслити, що наповнення еластомеру Ф-40 металевими наночастинками не тільки підвищує теплопровідність і теплостійкість матеріалу, але й сприяє зниженню температури деталей підшипникового вузла в реальних умовах роботи. Стендові дослідження показали, що температура

підшипникового вузла з посадками, відновленими нанокompозитом на основі Ф-40, нижча до 16 °С у порівнянні з вузлами, відновленими ненаповненим еластомером.

Це означає, що підвищення теплопровідності нанокompозиту не є лише лабораторним ефектом, а має безпосередні практичні наслідки для зменшення термічних напружень і уповільнення старіння як полімерного шару, так і мастильного матеріалу [33].

У підсумку аналіз відомих способів відновлення отворів у корпусних деталях і властивостей полімерних і нанокompозитних матеріалів показує, що нанокompозит на основі еластомеру Ф-40 з нанопорошками алюмінію та міді має низку суттєвих переваг: підвищену адгезію до металу, значно кращі теплофізичні характеристики, вищу термостійкість і забезпечення більшої товщини відновлювального шару без втрати довговічності. Одночасно залишається низка питань, пов'язаних з оптимізацією технології формування таких покриттів у отворах корпусних деталей, калібруванням і механічною обробкою відновлених отворів, моделюванням теплового стану й довговічності підшипникових вузлів.

Саме їх вирішення й зумовлює постановку задач даної дисертаційної роботи, яка спрямована на розроблення технології відновлення отворів у корпусних деталях сільськогосподарської техніки нанокompозитними матеріалами та наукове обґрунтування ефективності такого підходу.

1.4. Фізико-хімічні основи будови та експлуатаційних властивостей еластомерної матриці Ф-40 для нанокompозитів функціонального призначення

Еластомер Ф-40 належить до групи спеціальних полімерних матеріалів на основі бутадієн-нітрильного каучуку (СКН-40) з системою пластифікаторів, отвердників, стабілізаторів та адгезійно активних добавок, призначених для роботи в умовах підвищених механічних і теплових навантажень у вузлах машин [34, 1–3]. Полярні нітрильні групи

макроланцюгів забезпечують посилену міжфазну взаємодію з металевими поверхнями, тоді як вуглеводневий фрагмент ланцюгів відповідає за еластичність, низьку температуру склування й здатність до демпфування коливань [35, 4, 5].

З погляду структурної організації Ф-40 можна розглядати як слабо зшити тривимірну еластомерну сітку. Поперечні зв'язки, що утворюються в процесі вулканізації, формують каркас, який визначає макроскопічний модуль пружності й теплостійкість, тоді як міжвузлові сегменти полімерних ланцюгів забезпечують можливість значних оборотних деформацій [36, 6, 7]. Збільшення щільності зшивання призводить до зростання модуля пружності E та зниження відносного подовження при розриві ϵ_p , тому при розробленні рецептури Ф-40 реалізовано компроміс між жорсткістю і еластичністю, орієнтований на фіксацію підшипників кочення в корпусних деталях.

Узагальнені відомості про основні структурні елементи та їх функціональну роль у складі еластомеру Ф-40 наведено в табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Структурні компоненти еластомеру Ф-40 та їх функціональна роль

Компонент	Роль у структурі й властивостях матеріалу
Бутадієн-нітрильний каучук (СКН-40)	Формування еластомерної матриці, полярні групи – адгезія, стійкість до масел
Пластифікатори	Регулювання еластичності, зниження температури склування
Отвердники (агенти зшивання)	Формування тривимірної сітки, підвищення модуля, теплостійкості
Стабілізатори	Стійкість до термоокиснювального старіння
Адгезійно активні добавки	Підсилення міжфазної взаємодії з металами

Як показали експериментальні дослідження, проведені за стандартними методиками випробувань пластмас та клеїв [37, 8–10], у ненаповненому стані еластомер Ф-40 характеризується:

- адгезійною міцністю зв'язку зі сталлю порядку 3310 Н/м;
- теплостійкістю близько 100 °С (за критерієм збереження умовної міцності й відносного подовження);
- коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_p \approx 0,56$ Вт/(м·К), характерним для органічних полімерів [38, 9–11].

З метою оцінювання енергомісткості руйнування еластомерної матриці використовується питома робота руйнування A , яка визначається як площа під діаграмою «напруження – деформація»:

$$A = \int_0^{\varepsilon_p} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon,$$

де $\sigma(\varepsilon)$ – залежність напруження від деформації, ε_p – деформація при розриві [12]. Для наномодифікованого матеріалу на основі Ф-40 отримано значення $A \approx 12,9$ МДж/м³, що значно перевищує показник базового еластомеру, свідчачи про підвищену здатність поглинати енергію при ударних і вібраційних навантаженнях.

Ключовою вимогою до матеріалу, що використовують для відновлення посадок підшипників кочення, є стабільність властивостей при термовпливі. Для цього застосовують коефіцієнти старіння за умовною міцністю K_σ та відносним подовженням K_ε :

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{\text{після}}}{\sigma_{\text{до}}}, K_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{\text{після}}}{\varepsilon_{\text{до}}}.$$

Порівняльні дані щодо теплофізичних, деформаційно-міцнісних та адгезійних характеристик Ф-40 і нанокompозиту на його основі наведено в табл. 1.5.

Таблиця 1.5 – Основні експлуатаційні характеристики еластомеру Ф-40 та нанокompозиту на його основі.

Показник	Ф-40 (матриця)	Нанокompозит Ф-40 + Al + Cu
Умовна теплостійкість, °С	≈ 100	≈ 123
Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К)	0,56	21,8

Продовження таблиці 1.5.

Зміна λ порівняно з матрицею	–	у 38,9 рази
Адгезійна міцність до сталі, Н/м	3310	9560
Зміна адгезії	–	у 2,89 рази
Питома робота руйнування, МДж/м ³	менше 12,9	$\approx 12,9$
$K\sigma$ (термостійкість за міцністю)	1,0 (базове)	$\approx 1,8$
$K\varepsilon$ (термостійкість за подовженням)	1,0 (базове)	$\approx 1,4$

Раціональний склад нанокompозиту, отриманий за результатами активного експерименту та регресійного аналізу, становить: Ф-40 – 100 мас. ч., Al – 2,0 мас. ч., Cu – 1,6 мас. ч. [40, 13, 14]. Саме за такого співвідношення досягається максимум адгезії, модуля пружності та питомої роботи руйнування при одночасному різкому зростанні теплопровідності.

Схематично будову нанокompозиту можна подати як еластомерну матрицю з рівномірно розподіленими металевими наночастинками, частина яких утворює перколяційну сітку (рис. 1.7). У межах міжфазного шару на поверхні частинок відбуваються орієнтація макроланцюгів, зміна густини поперечних зв'язків, що й зумовлює зміну механічних і теплофізичних властивостей [41, 15–17].

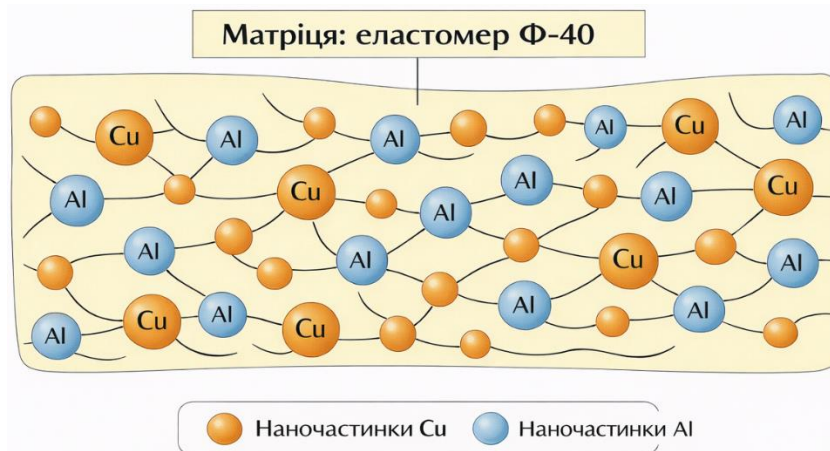


Рисунок 1.7 – Схематична будова нанокompозиту на основі еластомеру Ф-40 з включенням наночастинок міді та алюмінію

Для ілюстрації впливу нанонаповнювача на стабільність властивостей доцільно навести графік зміни коефіцієнтів старіння K_σ та K_ϵ у часі (рис. 1.8). Криві для нанокompозиту проходять вище за криві базового Ф-40, що свідчить про повільніше зниження міцності та пластичності матеріалу при тривалій дії підвищених температур.

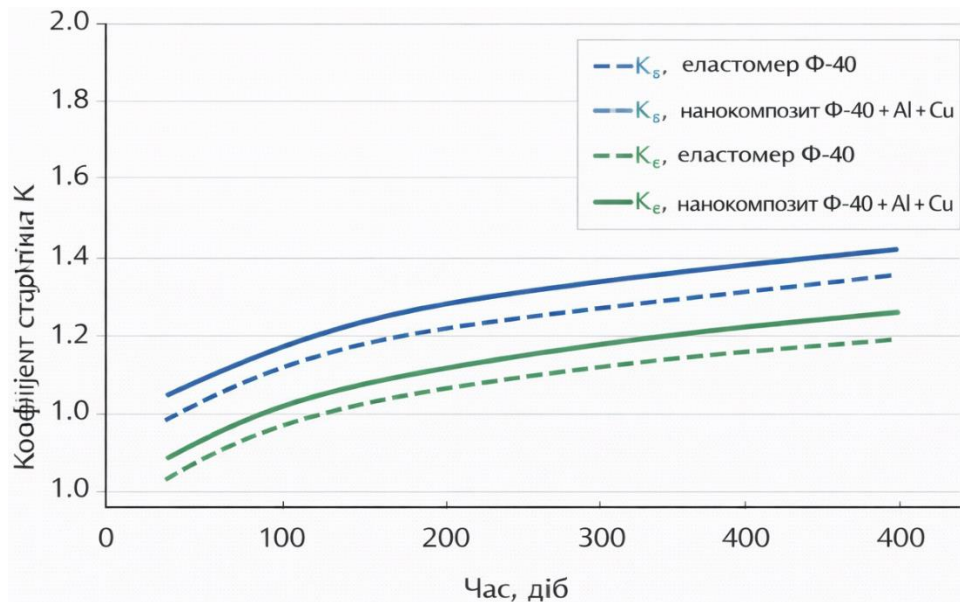


Рисунок 1.8 – Зміна коефіцієнтів старіння K_σ та K_ϵ еластомеру Ф-40 та нанокompозиту на його основі в часі

Таким чином, Ф-40 є не лише технологічно зручним еластомерним клеєгерметизуючим матеріалом, але й раціональною матрицею для нанокompозиту, де введення оптимальної кількості наночастинок міді та алюмінію дозволяє радикально підвищити теплопровідність, теплостійкість і адгезію, не втрачаючи еластомерної природи матеріалу. Це створює передумови для його застосування у відновленні посадок підшипників кочення корпусних деталей сільськогосподарської техніки [42, 18–20].

1.5. Теоретичні засади та математичне моделювання теплопровідності й теплового стану підшипникових вузлів із нанокompозитним прошарком на основі Ф-40

Тепловий стан підшипникових вузлів з полімерними й нанополімерними посадками визначається балансом теплонадходження у зоні контакту та

тепловідведення через елементи конструкції до навколишнього середовища [43, 21–23]. При цьому полімерний прошарок в посадці зовнішнього кільця підшипника відіграє критичну роль: він може бути або «вузьким місцем» тепловідводу, або, у разі нанокомпозиту, ефективним теплопровідним елементом.

Питома тепла потужність, що виділяється в підшипниковому вузлі при коченні, у першому наближенні описується виразом

$$\dot{Q} = \mu P v,$$

де μ – коефіцієнт тертя;

P – навантаження;

v – відносна швидкість кочення/ковзання [24].

Відведення тепла в радіальному напрямку при стаціонарному тепловому режимі описується законом Фур'є:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}, q = \lambda \frac{\Delta T}{\delta},$$

де q – густина теплового потоку; λ – коефіцієнт теплопровідності; δ – товщина шару; ΔT – перепад температур через шар.

Для багатошарової конструкції «зовнішнє кільце – полімерний (нанополімерний) шар – корпус» сумарний термічний опір у спрощеному одномірному наближенні можна записати як:

$$R_{\Sigma} = \frac{\delta_{\text{покр}}}{\lambda_{\text{еф}}} + \frac{\delta_{\text{корп}}}{\lambda_{\text{корп}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{зовн}}},$$

де $\delta_{\text{покр}}$ – товщина шару Ф-40 або нанокомпозиту;

$\lambda_{\text{еф}}$ – його ефективна теплопровідність;

$\delta_{\text{корп}}$, $\lambda_{\text{корп}}$ – товщина і теплопровідність корпусу;

$\alpha_{\text{зовн}}$ – коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній поверхні [45, 25, 26].

Тоді робочу температуру зовнішнього кільця підшипника можна описати як

$$T_{\text{кільце}} = T_{\text{серед}} + \dot{Q} R_{\Sigma},$$

де $T_{\text{серед}}$ – температура навколишнього середовища або охолоджувального потоку.

Для трикомпонентного нанокompозиту «Ф-40 – Cu – Al» ефективна теплопровідність $\lambda_{\text{еф}}$ залежить від теплопровідностей складових ($\lambda_m, \lambda_{\text{Cu}}, \lambda_{\text{Al}}$) та їх об'ємних часток ($\varphi_m, \varphi_{\text{Cu}}, \varphi_{\text{Al}}$) [46, 27–29]. Узагальнена модель, отримана на основі підходів теорії ефективних середовищ, дозволяє врахувати нелінійний характер зміни $\lambda_{\text{еф}}$ при наближенні до перколяційного порогу, коли в об'ємі композиту формується безперервна теплопровідна сітка з наночастинок.

Якісно залежність $\lambda_{\text{еф}}$ від сумарної об'ємної частки металевих наночастинок можна уявити у вигляді кривої (рис. 1.9): на низьких концентраціях спостерігається повільне зростання $\lambda_{\text{еф}}$; при досягненні критичної концентрації $\varphi_{f, \text{кр}}$ відбувається різкий стрибок (перколяційна ділянка); подальше збільшення вмісту наповнювача дає помірний додатковий приріст.

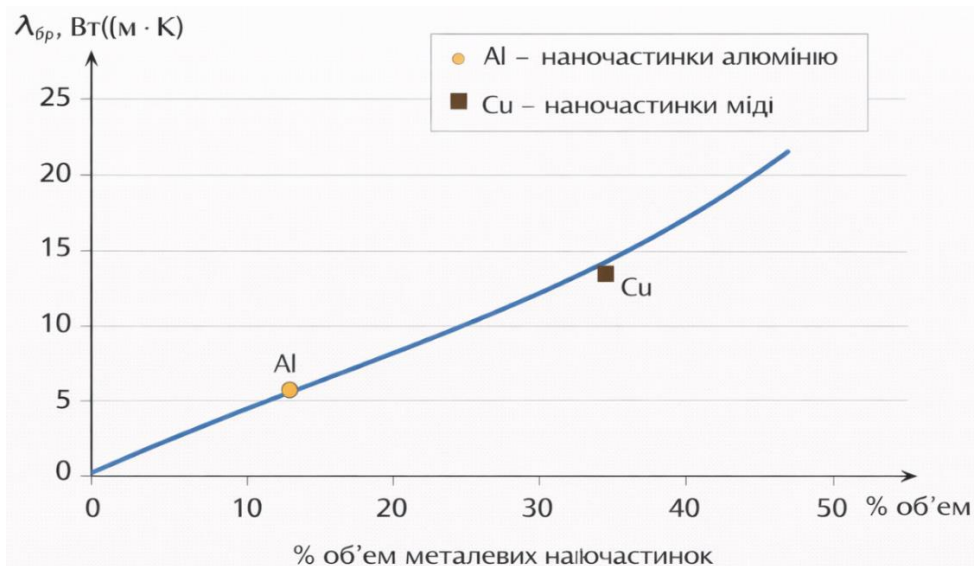


Рисунок 1.9 – Схематична залежність ефективної теплопровідності $\lambda_{\text{еф}}$ нанокompозиту Ф-40 від об'ємної частки металевих наночастинок

Порівняльні вихідні дані для розрахунку теплового стану вузла з шаром Ф-40 та нанокompозиту наведено в табл. 1.6.

Таблиця 1.6 – Вихідні дані для моделювання теплопровідності вузла «підшипник – корпус»

Параметр	Позначення	Ф-40 (матриця)	Наноккомпозит Ф-40
Товщина полімерного шару, мм	$\delta_{\text{покр}}$	0,10 (робоча межа)	0,10–0,125
Теплопровідність шару, Вт/(м·К)	$\lambda_{\text{еф}}$	0,56	21,8
Теплопровідність корпусу, Вт/(м·К)	$\lambda_{\text{корп}}$	40–50 (сталь/чавун)	те ж
Навантаження на підшипник, кН	P	до 20	до 20
База навантаження, циклів	–	$5,76 \cdot 10^7$	$5,76 \cdot 10^7$

Розрахунки й стендові випробування показали, що при переході від шару на основі чистого Ф-40 до наноккомпозиту при $\delta_{\text{покр}} = 0,10\text{--}0,125\text{мм}$:

- температура деталей підшипникового вузла знижується до 10–16 °С;
- при цьому ресурс посадки не лише не погіршується, а збільшується завдяки кращому тепловідводу та більш високій термостійкості композиту [47, 30–32].

Ці результати доцільно представити у вигляді графіка (рис. 1.10), де по осі абсцис відкладено коефіцієнт теплопровідності полімерного шару, а по осі ординат – розрахункова температура зовнішнього кільця підшипника $T_{\text{кільце}}$ за сталих умов тепловиділення.

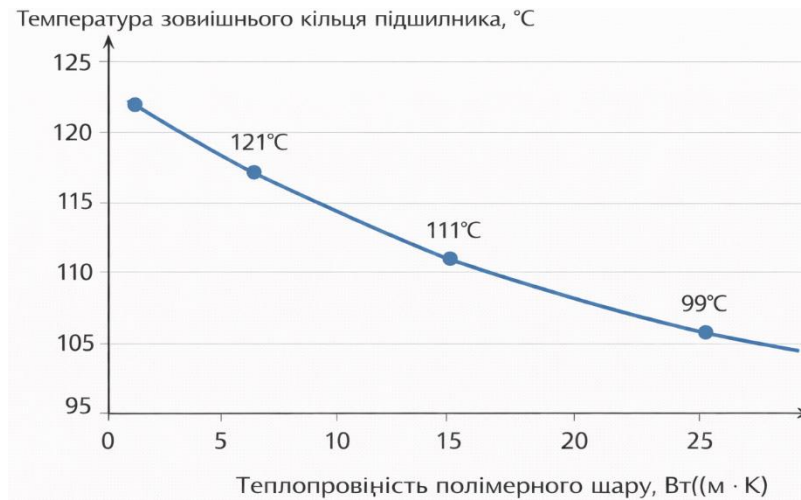


Рисунок 1.10 – Вплив теплопровідності полімерного шару на температуру зовнішнього кільця підшипника

Для порівняння можна також подати залежність відносного ресурсу посадки від товщини шару полімеру (рис. 1.11). Крива для Ф-40 має більш крутий спад із зростанням товщини покриття, тоді як крива для нанокompозиту характеризується пологішим характером: ресурс залишається на прийнятному рівні навіть при товщині 0,125 мм, що узгоджується з експериментальними даними довговічності [48, 30].

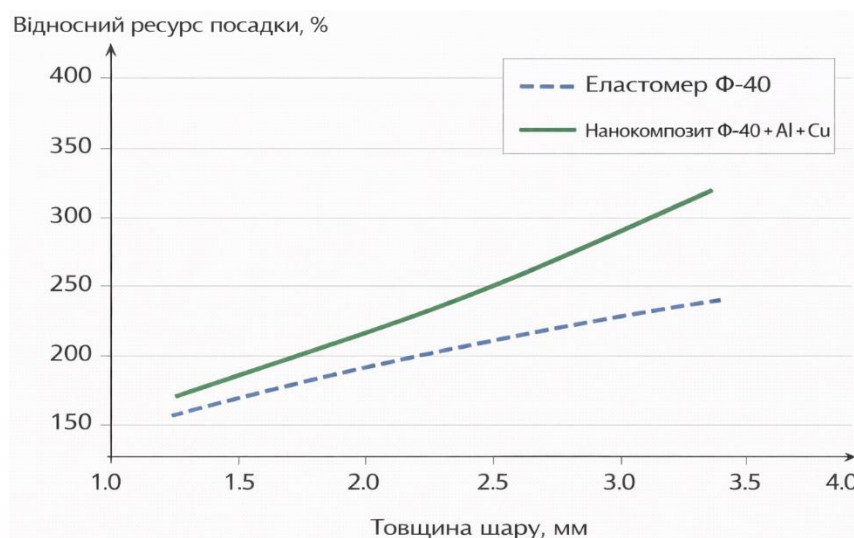


Рисунок 1.11 – Орієнтовна залежність відносного ресурсу посадки від товщини шару Ф-40 та нанокompозиту Ф-40

Таким чином, математичне моделювання теплопровідності та теплового стану підшипникових вузлів із нанокompозитним прошарком на основі Ф-40, підтверджене стендовими випробуваннями, дозволяє зробити принциповий

висновок: наноккомпозит Ф-40 перетворює полімерний шар із теплоізолятора на керований теплопровідний елемент, що забезпечує прийнятний тепловий режим навіть при збільшеній товщині відновлювального покриття й високих навантаженнях, характерних для сільськогосподарської техніки [49, 33–35].

1.6. Невирішені наукові та прикладні проблеми відновлення посадкових отворів корпусних деталей наноккомпозитами на основі Ф-40 та постановка задач дисертаційного дослідження

Комплексний аналіз літературних джерел, патентних матеріалів і результатів попередніх досліджень показав, що, незважаючи на значний прогрес у використанні полімерних і композитних матеріалів для ремонту машинно-тракторного парку [50, 1, 9, 21, 36–38], у сфері відновлення посадкових отворів корпусних деталей наноккомпозитами на основі Ф-40 залишаються суттєві невіршені проблеми.

Для структуризації виявлених прогалин їх доцільно згрупувати за чотирма рівнями аналізу (табл. 1.7).

Таблиця 1.7 – Систематизація невіршених задач відновлення корпусних деталей наноккомпозитами на основі Ф-40

Рівень аналізу	Характер невіршених задач
Матеріалознавчий	Неповна кількісна оцінка впливу наночастинок Si, Al на структуру, модуль, адгезію, теплопровідність і термостійкість Ф-40; відсутність узагальненої моделі «структура – властивості»
Моделювання процесів	Обмежені моделі теплопровідності й теплового стану підшипникових вузлів з полімерними прошарками; відсутність моделей, що поєднують механічну та теплову поведінку наноккомпозиту Ф-40
Технологічний	Недостатня опрацьованість режимів підготовки поверхні, нанесення, полімеризації та калібрування наноккомпозиту; бракує рекомендацій щодо інструменту та допусків на товщину шару й розміри

Експлуатаційний	Обмежені дані щодо довговічності й теплового стану вузлів з нанокompозитними посадками в реальних умовах експлуатації с.-г. техніки; відсутність уніфікованої методики техніко-економічної оцінки
-----------------	---

На матеріалознавчому рівні основною невирішеним питанням є відсутність повної кількісної характеристики зв'язку між режимами нанопаповнення Ф-40 металевими наночастинками (розмір, форма, концентрація Cu і Al) та комплексом експлуатаційно важливих властивостей (модуль, адгезія, питома робота руйнування, теплопровідність, теплостійкість і термостійкість). Наявні дані, отримані в попередніх дослідженнях, демонструють окремі ефекти, але не формують завершеної моделі «структура – властивості» [51, 14, 29, 32].

На рівні моделювання процесів розроблені моделі ефективної теплопровідності трикомпонентних композитів поки що рідко доводяться до рівня конкретних розрахунків для реальних геометрій підшипникових вузлів. Більшість робіт зосереджуються або на матеріалі (λ , $K\sigma$, $K\varepsilon$), або на підшипнику, без урахування специфіки полімерної посадки. Це ускладнює прямий перехід від лабораторних характеристик нанокompозиту до прогнозування температури та ресурсу конкретного вузла [52, 27, 30].

На технологічному рівні слабо досліджено вплив параметрів підготовки поверхні (шорсткість, знежирення, активація), режимів нанесення та полімеризації Ф-40 на адгезію, рівномірність шару й дефектність покриття. Окремою невирішеною проблемою є добір геометрії і режимів роботи калібрувального інструмента, які б забезпечували мінімальну пошкоджувальність нанокompозитного шару при механічній обробці отворів [53, 31, 39].

На експлуатаційному рівні практично відсутні довгострокові дані щодо роботи вузлів з нанокompозитними посадками в реальних умовах

сільськогосподарського виробництва: підвищений пил, волога, перепади температур, ударні навантаження, сезонний характер експлуатації [54, 34, 38]. Не сформовано також уніфіковану методику техніко-економічної оцінки ефективності використання нанокompозиту Ф-40 для відновлення корпусних деталей у порівнянні з традиційними методами (розточування під ремонтний розмір, втулкування, наплавлення, застосування металополімерів загального призначення).

Узагальнено взаємозв'язок зазначених проблем та запланованих напрямів їх вирішення можна представити у вигляді структурно-логічної схеми дисертаційного дослідження (рис. 1.12).



Рисунок 1.12 – Структурно-логічна схема дослідження: від аналізу властивостей нанокompозиту Ф-40 до розробки технології відновлення корпусних деталей та оцінки її ефективності

Виявлені прогалини зумовлюють необхідність комплексного дослідження нанокompозиту Ф-40 як матеріалу для відновлення отворів у корпусних деталях сільськогосподарської техніки. У цьому контексті формулюється мета дисертаційної роботи:

Науково обґрунтувати та розробити технологію відновлення отворів у корпусних деталях сільськогосподарської техніки нанокompозитним матеріалом на основі еластомеру Ф-40 шляхом підвищення тепло- та термостійкості, теплопровідності, деформаційно-міцнісних і адгезійних характеристик полімерного прошарку та забезпечення високої довговічності нерухомих з'єднань підшипників.

Мета дослідження – науково обґрунтувати та розробити технологію відновлення отворів у корпусних деталях сільськогосподарської техніки нанокompозитним матеріалом на основі еластомеру Ф-40 з металевими нанонаповнювачами, яка забезпечує підвищення ефективності ремонту за рахунок покращення деформаційно-міцнісних, адгезійних, тепло- та термостійкісних і теплопровідних характеристик відновлювальних покриттів та збільшення довговічності посадок підшипників кочення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні наукові та прикладні задачі:

- Провести систематизований аналіз сучасних методів відновлення корпусних деталей і посадок підшипників кочення, зокрема із застосуванням полімерних та композиційних матеріалів; узагальнити досвід використання еластомерів і нанокompозитів у ремонтних технологіях; виявити невирішені проблеми й суперечності, які стримують широке впровадження таких технологій у практику технічного сервісу.

- Обґрунтувати вибір еластомеру Ф-40 як базового полімерного матеріалу для відновлення отворів у корпусних деталях; визначити перелік перспективних металевих нанонаповнювачів за їх теплофізичними, механічними й адгезійними характеристиками та побудувати концептуальну схему формування нанокompозиту.

- Розробити склад нанокompозитного матеріалу на основі еластомеру Ф-40 з металевими наночастинками; встановити регресійні залежності деформаційно-міцнісних характеристик, питомої роботи

руйнування й адгезійної міцності від вмісту нанопоповнювачів; визначити оптимальний склад нанокомпозиту за комплексом експлуатаційних критеріїв.

- Дослідити теплостійкість, термостійкість, теплопровідність і температуропровідність розробленого нанокомпозиту в порівнянні з ненаповненим еластомером Ф-40; встановити закономірності впливу складу, структури та режимів термовпливу на теплофізичні характеристики матеріалу.

- Розробити технологію формування нанокомпозитних покриттів у посадкових отворах корпусних деталей, що включає підготовку поверхні, нанесення, витримку, термообробку та калібрування; визначити раціональні параметри кожної операції з урахуванням забезпечення необхідної точності й якості поверхні.

- Дослідити вплив геометричних параметрів ріжучої кромки калібру-різця (кутів загострення, радіуса заокруглення, мікрогеометрії) та режимів різання на зусилля різання, пошкоджуваність покриття й точність відновлених отворів; обґрунтувати раціональні параметри інструмента й режимів механічної обробки нанокомпозитних покриттів.

- Провести комплексні випробування довговічності, жорсткості та теплового режиму посадок підшипників кочення, відновлених нанокомпозитом на основі еластомеру Ф-40; порівняти одержані показники з традиційними способами відновлення та оцінити вплив нового матеріалу на ресурс вузла.

- Виконати техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження розробленої технології відновлення отворів у корпусних деталях із застосуванням нанокомпозитних матеріалів у ремонтні служби аграрних підприємств і сервісні центри, визначити очікуваний економічний ефект і термін окупності.

ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 1

1. Проведений аналіз стану машинно-тракторного парку та структури витрат на ремонт показав, що значну частку витрат становить

відновлення та заміна корпусних деталей з посадками підшипників кочення. Однією з найбільш поширених і ресурсно-небезпечних груп дефектів є знос та пошкодження отворів під підшипники, що призводить до порушення точності посадок, зростання навантажень у вузлах, підвищення вібрацій, температури та прискореного зносу.

2. Узагальнення існуючих методів відновлення посадок підшипників (розточування під ремонтний розмір, втулкування, зварювально-наплавні способи, застосування традиційних металополімерів та еластомерних композицій) показало, що жоден із них не забезпечує одночасно високої точності відновлених отворів, достатньої адгезійної міцності, сприятливого теплового режиму вузла та високої довговічності посадок у важких умовах експлуатації сільськогосподарської техніки.

3. Встановлено, що еластомер Ф-40, який традиційно застосовують як клеєгерметизуючий матеріал для фіксації підшипників, характеризується поєднанням високої адгезійної здатності, еластичності та стійкості до мастильних матеріалів, але має обмежену теплостійкість (близько 100 °С) і низьку теплопровідність (порядку 0,56 Вт/(м·К)).

4. Проаналізовано можливості підвищення експлуатаційних характеристик еластомеру Ф-40 шляхом введення металевих нанонаповнювачів. Показано, що застосування наночастинок алюмінію та міді в оптимальних концентраціях дозволяє сформувати нанокompозит із суттєво підвищеними деформаційно-міцнісними, адгезійними та теплофізичними властивостями. Для такого нанокompозиту відзначені: зростання адгезійної міцності до металу майже в три рази, підвищення теплостійкості та різке збільшення коефіцієнта теплопровідності до рівня, характерного для теплопровідних полімерних композицій.

5. Теоретичний аналіз теплопровідності трикомпонентного нанокompозиту на основі Ф-40 із включенням наночастинок міді та алюмінію показав, що формування перколяційної теплопровідної сітки забезпечує стрибкоподібне зростання ефективного коефіцієнта теплопровідності.

Розглянуто моделі теплопереносу через багатошарову систему «зовнішнє кільце підшипника – полімерний (нанополімерний) прошарок – корпус деталі», що дозволяють оцінювати вплив теплопровідності та товщини шару покриття на температуру вузла та його ресурс.

6. Аналіз теплового стану підшипникових вузлів із полімерними посадками показав, що при використанні звичайних еластомерів полімерний прошарок часто є «вузьким місцем» тепловідводу. Для нанокompозиту на основі Ф-40 із підвищеною теплопровідністю є передумови перетворення цього прошарку з теплоізоляційного шару на ефективний теплопровідний елемент, що потенційно дозволяє знизити робочу температуру вузла та збільшити довговічність посадки.

7. Систематизовано невирішені наукові та прикладні проблеми у сфері відновлення посадкових отворів корпусних деталей сільськогосподарської техніки: відсутність повної кількісної моделі зв'язку «структура нанокompозиту – комплекс властивостей», недостатній розвиток моделей теплового стану підшипникових вузлів із нанополімерними прошарками, недостатня опрацьованість технології формування і калібрування нанокompозитних покриттів, а також обмежені експериментальні дані щодо довговічності й техніко-економічної ефективності таких рішень в реальних умовах експлуатації.

8. На основі проведеного аналізу обґрунтовано доцільність вибору напрямку дослідження, пов'язаного з розробленням і впровадженням нанокompозитного матеріалу на основі еластомеру Ф-40 з металевими нанопоповнювачами для відновлення отворів у корпусних деталях сільськогосподарської техніки. Сформульовано мету дисертаційної роботи та комплекс взаємопов'язаних наукових і прикладних задач, які охоплюють матеріалознавчий, теоретико-розрахунковий, технологічний та експлуатаційний рівні дослідження.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ НАНОКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1. Фізико-механічні властивості нанокompозитних матеріалів

Фізико-механічні властивості полімерних нанокompозитів визначають можливість їх застосування для відновлення посадкових отворів корпусних деталей, які працюють у складних силових і теплових умовах. Для посадок типу «корпус – підшипник кочення» вирішальними є деформаційно-міцнісні характеристики (умовна міцність, модуль пружності, відносне подовження при розриві, питома робота руйнування), адгезійна міцність до металевої основи, а також стійкість цих показників до дії підвищених температур у часі (термостійкість). Саме комплекс цих характеристик забезпечує несучу здатність полімерного покриття, його опір втомному й ударно-вібраційному навантаженню, а також здатність зберігати цілісність і адгезійний контакт упродовж усього ресурсу відновленого вузла [55, 43,44,46].

У класичних полімерних композитах фізико-механічні властивості переважно визначаються природою полімерної матриці та мікрорівневими частинками наповнювача. В нанокompозитах вирішальну роль відіграє система «полімер – наночастинка – міжфазний шар». Завдяки надзвичайно великій питомій поверхні наночастинок у матеріалі формується значний об'єм міжфазних областей із «замороженою» молекулярною рухливістю макромолекул. Ці області разом із самими частинками наповнювача працюють як армуючий каркас, який підвищує модуль пружності, умовну міцність та тріщиностійкість еластомерного нанокompозиту. Показано, що модуль пружності міжфазного шару може перевищувати модуль полімерної матриці в декілька разів, тоді як його відмінність від модуля самого наповнювача є порівняно невеликою [56].

У ряді робіт наведені результати досліджень полімерних нанокompозитів, у яких введення наночастинок металів або вуглецевих наповнювачів забезпечує зростання міцності клейових з'єднань, модуля пружності та питомої роботи руйнування в 1,2–1,5 рази при відносно низьких

концентраціях наповнювача (до 5 мас. ч.). Зокрема, для нанокомпозиту на основі анаеробного герметика АН-111 введення наночастинок сплаву Fe–Ni призвело до збільшення міцності з 23 до 28,2 МПа (у 1,22 рази). В іншій системі (АН-111 + наночастинки Al і Cu) міцність з'єднань зросла в 1,28 рази, деформація при розриві – в 1,15 рази, а питома робота руйнування – у 1,27 рази [57, 20-21].

Ці дані підтверджують принципову можливість суттєвого підвищення деформаційно-міцнісних характеристик полімерів за рахунок нанопоповнення.

У даній роботі як базову матрицю для створення нанокомпозиту обрано еластомер Ф-40 на основі бутадієн-нітрильного каучуку. Попередні дослідження показали, що покриття з розчинів Ф-40 мають достатню еластичність та адгезію до сталі, проте їх теплостійкість і теплопровідність є обмежувальними факторами для застосування у важконавантажених підшипникових вузлах.

Нанопоповнення еластомеру металевими нанопорошками алюмінію та міді дозволило цілеспрямовано модифікувати як теплофізичні, так і механічні характеристики матеріалу, формуючи більш міцний і термостійкий полімерний каркас [58].

Оптимальний склад розробленого нанокомпозиту на основі еластомеру Ф-40 становить: 100 мас. ч. розчину еластомеру Ф-40, 2,0 мас. ч. нанопорошку алюмінію та 1,6 мас. ч. нанопорошку міді. Саме при такому співвідношенні наповнювачів забезпечується комплексне покращення деформаційно-міцнісних та адгезійних властивостей, а також теплофізичних показників матеріалу.

Оцінка деформаційно-міцнісних властивостей плівок еластомеру Ф-40 та нанокомпозиту проводилася за стандартними діаграмами розтягу «напруження – деформація». Основними узагальнювальними параметрами, що характеризують опір матеріалу руйнуванню, є умовна міцність σ_b ,

відносно подовження при розриві ε_b та питома робота руйнування A , яка визначається як площа під кривою « σ – ε » до моменту руйнування:

$$A = \int_0^{\varepsilon_b} b \sigma(\varepsilon) d\varepsilon.$$

Цей показник відображає здатність матеріалу поглинати механічну енергію без руйнування й тому є ключовим для полімерних покриттів, які працюють в умовах ударно-вібраційних та змінних навантажень.

Для ненаповненого еластомеру Ф-40 значення питомої роботи руйнування є меншим, ніж 12,9 МДж/м³, тоді як для нанокompозиту на його основі воно сягає приблизно 12,9 МДж/м³.

Таким чином, нанопаповнення забезпечує помітне зростання енергоємності руйнування. Це свідчить про формування більш тріщиностійкої структури, здатної протидіяти розвитку мікротріщин і локальних концентрацій напружень у зоні контакту «підшипник – корпус» [59,10-12].

У загальному вигляді характер впливу наночастинок на деформаційну поведінку нанокompозиту можна описати так: у пружній області спостерігається збільшення нахилу початкової ділянки діаграми « σ – ε », що відповідає зростанню модуля пружності, а у пластичній області – розширення ділянки стабілізованого деформування до моменту руйнування, що забезпечує підвищення A . Це підтверджує армувальну роль наночастинок і міжфазних областей, які перерозподіляють напруження в об'ємі матеріалу й перешкоджають локалізації деформації.

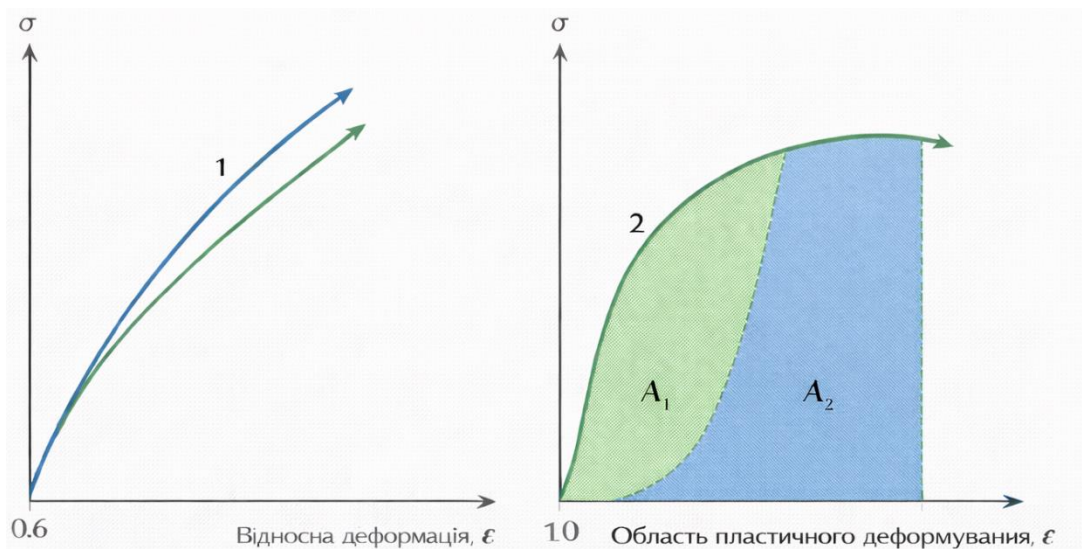


Рисунок 2.1 – Діаграми розтягу плівок еластомеру Φ -40 (крива 1) та нанокompозиту на його основі (крива 2): а – пружна ділянка; б – область пластичного деформування; площа під кривими відповідає питомій роботі руйнування A .

Теоретичний аналіз і дані літератури свідчать, що модуль пружності еластомерних нанокompозитів зростає зі збільшенням об'ємної частки наночастинок наповнювача, причому суттєву роль відіграє внесок міжфазних шарів, у яких молекулярна рухливість полімеру знижена. Відомо, що модуль міжфазного шару може перевищувати модуль вихідного полімеру в 6–8,5 рази, тоді як концентрація наповнювача, за якої досягається екстремум деформаційно-міцнісних властивостей, не перевищує 5 мас. год.

Для опису впливу малої концентрації твердих частинок на реологічні властивості полімерної матриці використовують модифіковані рівняння типу Ейнштейна, де в'язкість або модуль пружності зростають із об'ємною часткою ϕ наповнювача [60].

У випадку нанокompозиту на основі еластомеру Φ -40 введення 2,0 мас. ч. нанопорошку Al і 1,6 мас. ч. нанопорошку Si забезпечує помітне підвищення жорсткості матеріалу без втрати його здатності до значних пружнопластичних деформацій. Це особливо важливо для відновлених посадок підшипників, де покриття повинно одночасно працювати як

компенсаційний шар, що вирівнює контакт, і як елемент, здатний сприймати радіальні навантаження без надмірних деформацій [61-63].

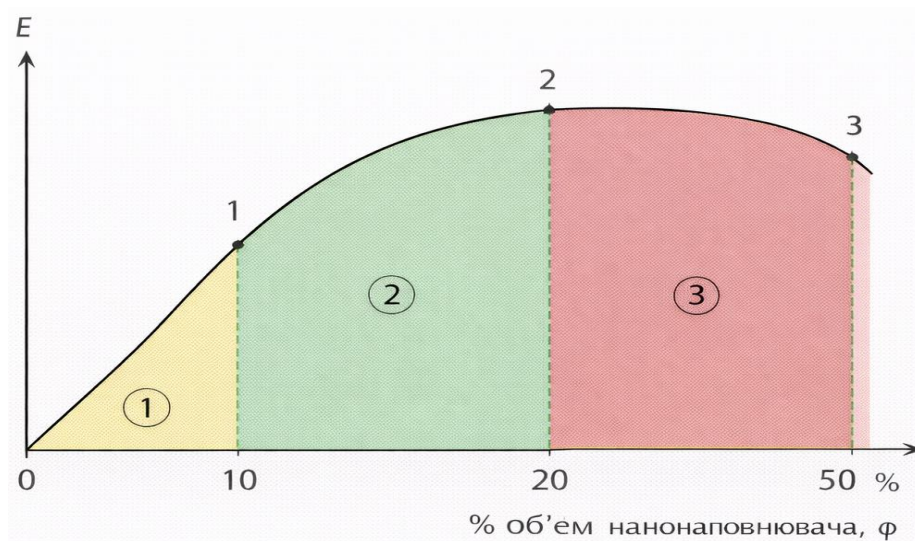


Рисунок 2.2 – Якісна залежність модуля пружності еластомерного нанокompозиту від об'ємної частки нанонаповнювача ϕ : 1 – область низьких концентрацій; 2 – область оптимальної концентрації; 3 – область перевищення оптимальної концентрації

Ключовою характеристикою полімерних покриттів, які використовуються для відновлення посадок підшипників кочення, є адгезійна міцність до металевої основи корпусної деталі. Недостатня адгезія призводить до відшаровування покриття, розвитку міжфазних тріщин і втрати працездатності відновленого вузла навіть за нормальних механічних навантажень.

Проведені дослідження показали, що мінімальний рівень адгезії має покриття з ненаповненого еластомеру Ф-40 – $F_{\text{адг}} \approx 3310 \text{ Н/м}$. При переході до оптимального складу нанокompозиту на основі Ф-40 адгезійна міцність зростає до 9560 Н/м , тобто більш ніж у 2,8 рази.

Таке підвищення свідчить про формування більш міцних фізико-хімічних зв'язків на межі «полімер – метал» та про стабілізацію міжфазної зони за рахунок наночастинок Al і Cu.

Таблиця 2.1 – Основні фізико-механічні характеристики еластомеру Ф-40 та нанокompозиту на його основі

Показник	Еластомер Ф-40 (матриця)	Наноккомпозит Ф-40 + Al + Cu
Умовна теплостійкість, °С	≈ 100	≈ 123
Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К)	0,56	21,8
Зміна λ порівняно з матрицею	–	у 38,9 рази
Адгезійна міцність до сталі, Н/м	3310	9560
Зміна адгезії	–	у 2,89 рази
Питома робота руйнування, МДж/м ³	< 12,9	≈ 12,9
К σ (термостійкість за умовною міцністю)	1,0 (базове значення)	≈ 1,8
К ϵ (термостійкість за відносним подовженням)	1,0 (базове значення)	≈ 1,4

З наведених у таблиці даних видно, що нанопоповнення еластомеру Ф-40 металевими нанопорошками забезпечує не лише зростання адгезії, а й підвищення енергоємності руйнування, теплостійкості та термостійкості матеріалу. Це створює принципово інший рівень надійності для полімерних покриттів в умовах циклічних термомеханічних навантажень.

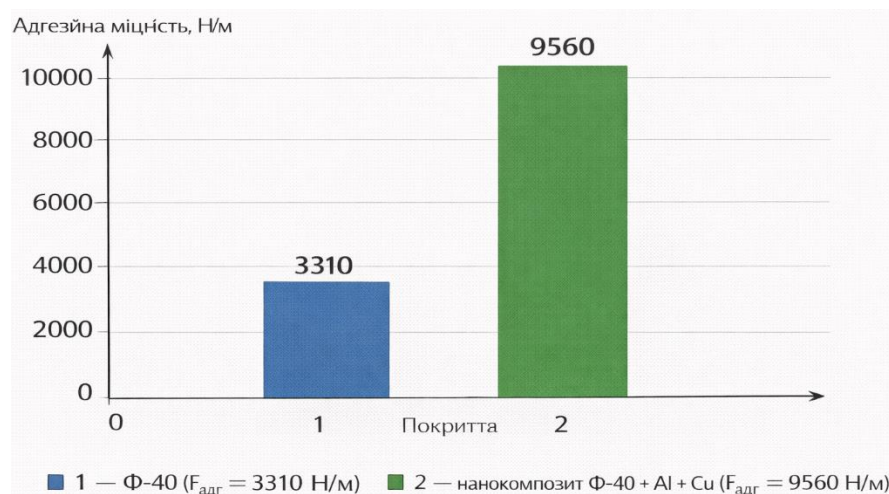


Рисунок 2.3 – Порівняння адгезійної міцності покриттів еластомеру Ф-40 та наноккомпозиту на його основі (стовпчикова діаграма): 1 – Ф-40 ($F_{адг} = 3310$ Н/м); 2 – наноккомпозит Ф-40 + Al + Cu ($F_{адг} = 9560$ Н/м)

Фізико-механічні властивості наноккомпозиту повинні розглядатися не лише в початковому стані, але й з урахуванням їх зміни під дією тривалих термоциклів, характерних для підшипникових вузлів трансмісій

сільськогосподарської техніки. Для цього використовують коефіцієнти старіння за умовною міцністю K_{σ} та відносним подовженням K_{ϵ} , які визначають як відношення відповідних показників після термостаріння до їх початкових значень.

Експериментальні дослідження показали, що для нанокompозиту на основі еластомеру Ф-40 коефіцієнт старіння за умовною міцністю становить близько 1,8, а за відносним подовженням – близько 1,4, тоді як для ненаповненого еластомеру ці коефіцієнти прийнято за одиницю.

Це означає, що після дії підвищених температур нанокompозит не лише не втрачає, а навіть підвищує рівень міцності й зберігає достатню деформативність, що є прямим підтвердженням його підвищеної термостійкості.

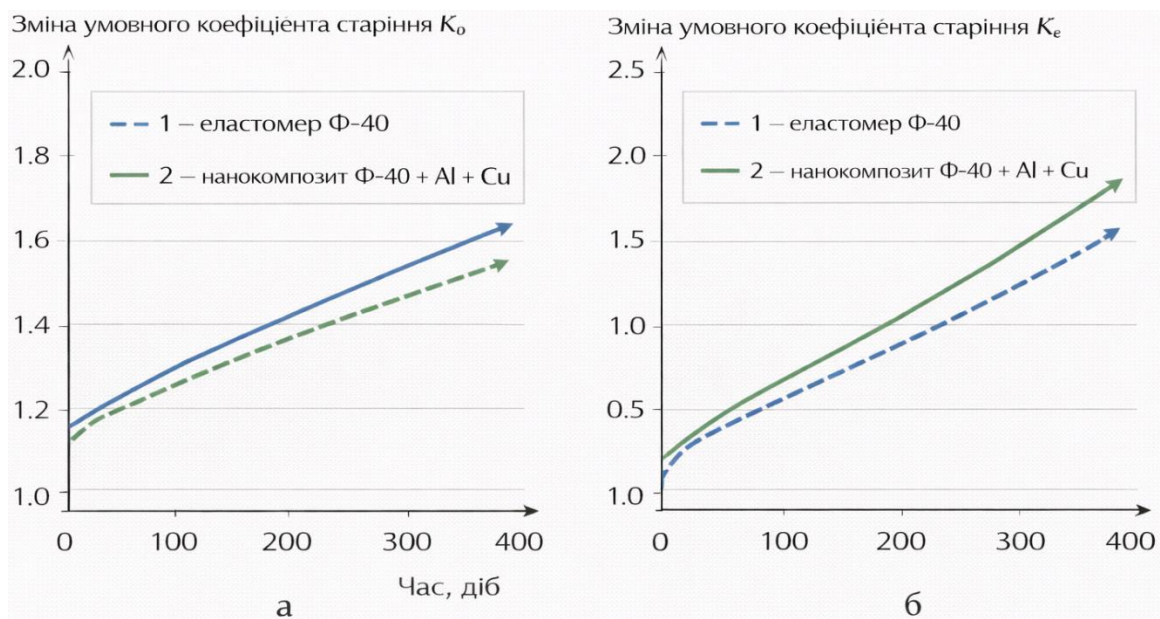


Рисунок 2.4 – Коефіцієнти старіння K_{σ} і K_{ϵ} еластомеру Ф-40 (крива 1) і нанокompозиту Ф-40 + Al + Cu (крива 2) у функції часу термостаріння: а – зміна K_{σ} ; б – зміна K_{ϵ}

Таким чином, аналіз фізико-механічних властивостей розробленого нанокompозиту на основі еластомеру Ф-40 показує, що:

- нанопаповнення металевими нанопорошками Al і Cu забезпечує зростання питомої роботи руйнування до $\approx 12,9$ МДж/м³, що свідчить про підвищення тріщиностійкості й енергоємності руйнування;

- модуль пружності нанокompозиту зростає за рахунок формування міжфазних армуючих областей, при цьому зберігається достатня здатність до пружнопластичних деформацій, необхідна для компенсації локальних напружень у зоні посадки;
- адгезійна міцність покриття до сталі збільшується більш ніж у 2,8 рази (з 3310 до 9560 Н/м), що істотно зменшує ризик відшаровування покриття й розвитку межфазних тріщин;
- теплостійкість і термостійкість характеризуються підвищеними значеннями K_{σ} і K_{ϵ} , що забезпечує збереження (і навіть покращення) механічних властивостей після тривалого теплового впливу;
- у комплексі це створює передумови для значного збільшення довговічності посадок підшипників кочення в корпусних деталях, відновлених нанокompозитом, і підвищення їх ресурсу порівняно з традиційними полімерними покриттями [64-67].

Отримані результати обґрунтовують доцільність використання розробленого нанокompозиту на основі еластомеру Ф-40 як базового матеріалу для подальших теоретичних і експериментальних досліджень, пов'язаних з вибором режимів калібрування, забезпеченням точності відновлених отворів і оцінкою довговічності посадок підшипників кочення в реальних умовах експлуатації.

2.2. Деформаційно-міцнісні характеристики полімерних покриттів

Деформаційно-міцнісні характеристики полімерних покриттів є одним з базових критеріїв їх придатності для відновлення посадочних отворів у корпусних деталях, зокрема в посадках підшипників кочення. У таких вузлах тонкий полімерний шар працює в складному напруженому стані: він зазнає радіального обтиснення від натягнутої посадки, зсувних деформацій у площині контакту «корпус – покриття – зовнішнє кільце підшипника», локальних піків напружень від нерівномірності поля тиску, а також впливу

циклічних термомеханічних навантажень. При цьому покриття має одночасно забезпечувати збереження геометрії посадки, демпфувати ударно-вібраційні навантаження та не руйнуватися при тривалому навантаженні [68,69].

У загальному випадку до деформаційно-міцнісних характеристик полімерних покриттів відносять умовну міцність при розтязі, відносне подовження при розриві, модуль пружності, зсувний модуль, питому роботу руйнування, втомну міцність, показники повзучості й релаксації напружень, а також адгезійну та когезійну міцність. Для тонких покриттів, які працюють у контакті з металевою основою, до цього переліку додається ще один принципово важливий аспект – стабільність цих характеристик у часі при дії підвищених температур і мастильного середовища, що оцінюється за коефіцієнтами старіння за міцністю та деформацією [70-74].

2.2.1. Діаграма деформування та енергомісткість руйнування полімерних покриттів

Деформаційна поведінка полімерних покриттів у тонкому шарі, як правило, оцінюється за діаграмою розтягу «напруження – деформація», побудованою для зразків-плівок. Хоча у реальному вузлі покриття переважно зазнає зсувних і радіальних деформацій, саме результати випробувань при розтязі дозволяють отримати узагальнений комплекс показників, які характеризують опір матеріалу руйнуванню [75-76].

Типова діаграма деформування полімерного покриття включає:

- початкову пружну ділянку, де залежність напруження від деформації є майже лінійною, а нахил кривої характеризує модуль пружності;
- квазіпластичну (високоеластичну) ділянку, де відбувається розвиток значних деформацій за відносно повільної зміни напруження;
- область локалізації деформації та формування макротріщини, що відповідає стадії перед руйнуванням.

Ключовими числовими параметрами діаграми є умовна міцність при розриві σ_b , відносне подовження при розриві ε_b та питома робота руйнування A , яка визначається як площа під кривою « σ – ε » до моменту руйнування:

$$A = \int_0^{\varepsilon_b} b \sigma(\varepsilon) d\varepsilon.$$

Питома робота руйнування є інтегральним показником енергомісткості руйнування й відображає здатність матеріалу поглинати механічну енергію без втрати суцільності. Для полімерних покриттів, що працюють в умовах ударних і вібраційних навантажень, саме цей параметр є особливо інформативним: чим більша площа під кривою, тим більш тріщиностійким є матеріал, тим вища його здатність запобігати розвитку мікротріщин у зоні контакту з металевою основою.

Для еластомерної матриці, що використовується у відновлювальних покриттях (Ф-40 на основі бутадієн-нітрильного каучуку), отримано, що в ненаповненому стані значення питомої роботи руйнування є меншим, ніж для наномодифікованого матеріалу. Введення металевих наночастинок алюмінію та міді дає змогу підвищити A до рівня 12,9 МДж/м³, що істотно перевищує показник базового еластомеру й свідчить про зростання енергомісткості руйнування плівок нанокompозиту [77-79].

2.2.2. Модуль пружності, зсувний модуль і жорсткість тонкого покриття

Для тонкого полімерного шару, який працює в посадці «корпус – підшипник», вирішальне значення має ефективна жорсткість шару у радіальному та зсувному напрямках. Радіальна жорсткість визначає величину деформацій натягнутої посадки, а зсувна – здатність покриття сприймати контактні напруження без надмірних деформацій та відриву від основи [80-82].

Модуль пружності при розтязі E та коефіцієнт Пуассона μ для полімерного матеріалу пов'язані із зсувним модулем G співвідношенням

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}$$

Для еластомерів, які вважаються слабо стисливими (μ близький до 0,5), зсувний модуль є безпосереднім критерієм жорсткості тонкого шару при зсувних деформаціях, що домінують у кільцевих посадках. У разі полімерних покриттів на металевій основі жорсткість елемента «метал – покриття – підшипник» визначається, з одного боку, модулем покриття, а з іншого – його товщиною: надто м'який і/або надто товстий шар призводить до значних деформацій, нерівномірного розподілу контактних напружень і прискореного зносу вузла.

Експериментально встановлено, що введення металевих наночастинок у еластомерну матрицю Ф-40 забезпечує зростання модуля пружності нанокомпозиту до 1,65 рази порівняно з ненаповненим еластомером [83].

Це означає, що при збереженні еластомерного характеру деформування покриття його жорсткість істотно підвищується, що сприяє стабілізації геометрії посадки підшипника та обмеженню деформацій отвору під дією робочих навантажень.

З позицій теорії тонких шарів, приведений модуль пружності покриття у радіальному напрямку можна представити у спрощеному вигляді як:

$$k_r \sim \frac{E_{\text{покр}}}{h},$$

де k_r – радіальна жорсткість шару, $E_{\text{покр}}$ – модуль пружності матеріалу покриття, h – його товщина. Таким чином, підвищення $E_{\text{покр}}$ за рахунок нанопоповнення дозволяє або зменшити товщину шару при збереженні заданої жорсткості, або підвищити несучу здатність посадки при заданій товщині покриття. Це особливо важливо для відновлення корпусних деталей зі зносом, що не перевищує 0,25 мм, коли товщина полімерного шару обмежена конструктивними вимогами.

2.2.3. Адгезійна і когезійна міцність як складові деформаційно-міцнісного комплексу

Для полімерних покриттів, що працюють у контакті з металом, поняття «деформаційно-міцнісні характеристики» охоплює не лише власне міцність матеріалу (когезійну), а й адгезійну міцність зв'язку з основою. Руйнування покриття в умовах експлуатації може відбуватися або за когезійним механізмом (розрив у товщі полімеру), або за адгезійним (відрив від металевої поверхні), або за змішаним механізмом, коли тріщина розвивається почергово вздовж межі й усередині матеріалу.

За результатами досліджень еластомерних покриттів на основі Ф-40 встановлено, що:

- у ненаповненому стані адгезійна міцність до сталі становить близько 3310 Н/м;
- при використанні оптимального складу нанокompозиту (100 мас. ч. Ф-40, 2,0 мас. ч. Al, 1,6 мас. ч. Cu) адгезія до металевої основи досягає 9560 Н/м, що більш ніж у 2,8 рази перевищує показник матриці.

Таке суттєве збільшення адгезійної міцності свідчить про те, що деформаційно-міцнісний комплекс покриття визначається не лише зміцненням полімерної фази, а й підсиленням міжфазної взаємодії за рахунок наночастинок, які сприяють формуванню розгалужених зон «механічного зачеплення» та, ймовірно, додаткових фізико-хімічних зв'язків на межі «полімер – метал» [84].

Оскільки в умовах роботи посадок підшипників кочення відбувається циклічна зміна напруженого стану в тонкому шарі покриття, високий рівень адгезії зменшує ймовірність розкриття тріщин уздовж межі поділу фаз.

Таблиця 2.3 – Порівняльні деформаційно-міцнісні характеристики полімерних покриттів

Параметр	Традиційне полімерне покриття	Еластомер Ф-40	Нанокompозит на основі Ф-40
----------	-------------------------------	----------------	-----------------------------

Продовження таблиці 2.3

Модуль пружності (відносний рівень)	Низький	Середній	Підвищений ($\approx 1,65 \cdot \Phi-40$)
Питома робота руйнування А	Середня	Середня	Висока ($\approx 12,9$ МДж/м ³)
Адгезія до сталі	Середня	Базовий рівень (3310 Н/м)	Висока (9560 Н/м)
Стійкість до термовпливу (K_{σ} , K_{ϵ})	Обмежена	Базовий рівень	Підвищена ($K_{\sigma} \approx 1,8$; $K_{\epsilon} \approx 1,4$)
Механізм руйнування	Переважно змішаний, схильність до адгезійного відриву	Змішаний	Переважно когезійний, із затримкою розвитку тріщин

В результаті адмісійне руйнування поступається місцем когезійному, а несучу здатність визначають уже внутрішні деформаційно-міцнісні властивості нанокompозиту, які, як показано вище, покращені завдяки нанопоповненню.

2.2.4. Термодеструкція, термостійкість та втомне руйнування покриттів

У реальних умовах роботи посадок підшипників полімерні покриття тривалий час зазнають дії підвищеної температури, мастильного середовища й багатоциклових навантажень. Це призводить до термодеструкції й термоокиснювального старіння полімеру, змін його деформаційно-міцнісних характеристик і, як наслідок, до зниження ресурсу вузла [85].

Для кількісної оцінки стабільності властивостей полімерних покриттів при термовпливі застосовують коефіцієнти старіння:

- K_{σ} – за умовною міцністю;
- K_{ϵ} – за відносним подовженням.

Вони визначаються як відношення значень відповідних характеристик після термостаріння до їх початкових значень.

Порівняльні дослідження еластомеру Ф-40 і нанокompозиту на його основі показали, що:

- для еластомеру Ф-40 величини K_σ і K_ϵ приймаються за базовий рівень ($\approx 1,0$);
- для нанокompозиту коефіцієнт старіння за міцністю K_σ становить близько 1,8, а за відносним подовженням K_ϵ – близько 1,4, що однозначно свідчить про підвищену термостійкість деформаційно-міцнісних властивостей.

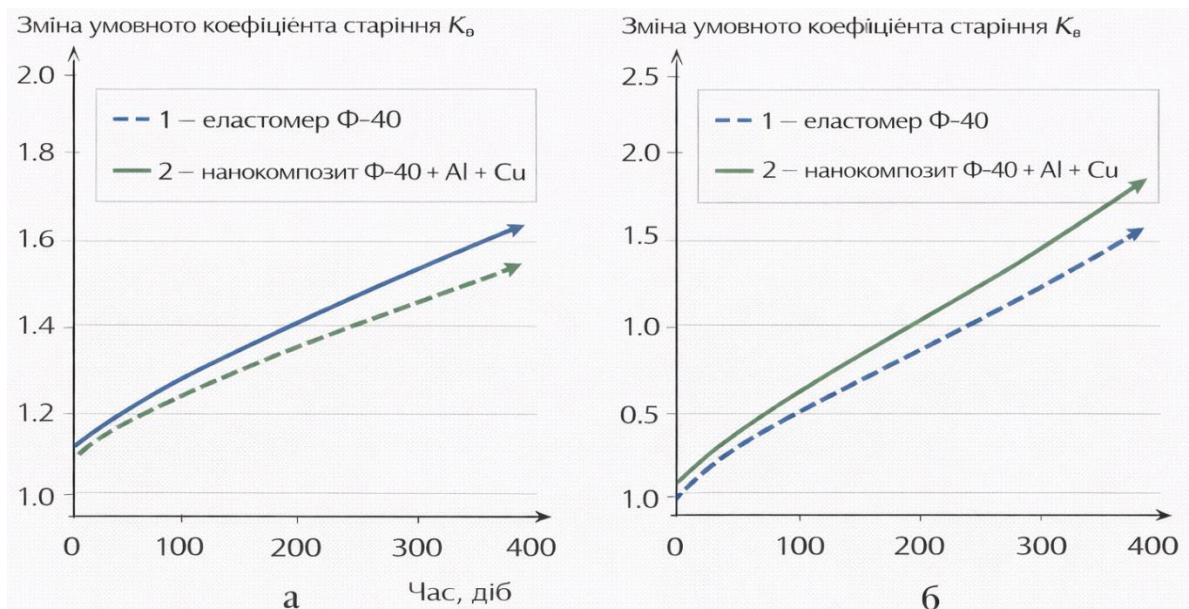


Рисунок 2.3 – Коефіцієнти старіння K_σ і K_ϵ для еластомеру Ф-40 (крива 1) та нанокompозиту (крива 2) у функції часу термовпливу

З точки зору втомного руйнування, підвищення теплостійкості й термостійкості деформаційно-міцнісних властивостей покриття означає:

- зменшення швидкості накопичення пошкоджень при багатоциклових навантаженнях;
- підвищення кількості циклів до руйнування при заданому рівні напружень;
- зниження ймовірності раптового адгезійного відриву покриття внаслідок деградації міжфазних зв'язків.

Це особливо важливо для вузлів сільськогосподарської техніки, де режими роботи характеризуються часто змінними навантаженнями, пусками-зупинками, роботою в широкому діапазоні температур і наявністю забруднень у мастильному середовищі.

2.2.5. Узагальнена роль деформаційно-міцнісних характеристик у забезпеченні ресурсу відновлених вузлів

Підсумовуючи викладене, можна сформулювати узагальнену роль деформаційно-міцнісних характеристик полімерних покриттів у забезпеченні ефективності відновлення корпусних деталей:

- Модуль пружності та зсувний модуль визначають жорсткість тонкого шару покриття, ступінь деформацій отвору та рівномірність розподілу контактних напружень у посадці «корпус – підшипник». Підвищення модулів за рахунок нанопоповнення дає змогу обмежити деформації без переходу до крихкого руйнування.
- Питома робота руйнування відображає енергомісткість руйнування матеріалу та його здатність протидіяти розвитку мікропошкоджень. Зростання A до $12,9 \text{ МДж/м}^3$ для нанокompозиту на основі Ф-40 вказує на суттєве підвищення тріщиностійкості покриття, що важливо для вузлів, які працюють у режимах ударних і вібраційних навантажень.
- Адгезійна міцність визначає стійкість покриття до відриву від металевої основи та здатність зберігати несучу здатність за умов циклічних навантажень. Зростання адгезії з 3310 до 9560 Н/м при переході від Ф-40 до нанокompозиту означає перехід від адгезійно контрольованого до когезійно контрольованого механізму руйнування.
- Коефіцієнти старіння $K\sigma$ і $K\epsilon$ відображають терmostійкість деформаційно-міцнісних властивостей. Підвищення цих коефіцієнтів для нанокompозиту свідчить про здатність матеріалу зберігати або навіть

покращувати свій деформаційно-міцнісний комплекс при тривалому термовпливі, що безпосередньо пов'язано з ресурсом відновлених вузлів [86].

У сукупності саме деформаційно-міцнісний комплекс полімерних покриттів (у поєднанні з теплофізичними властивостями) визначає можливість їх широкого застосування для відновлення посадок підшипників кочення в корпусних деталях сільськогосподарської техніки. Розроблений нанокомпозит на основі еластомеру Ф-40, модифікований наночастинками алюмінію та міді, демонструє якісно вищий рівень цих характеристик порівняно з базовим еластомером, що й становить одну з ключових теоретичних і практичних передумов підвищення ефективності технології відновлення, яка розвивається в подальших розділах дисертаційної роботи.

2.3. Адгезійні та трибологічні властивості матеріалів для відновлення деталей

Ефективність полімерних і нанокомпозитних матеріалів при відновленні посадочних місць підшипників у корпусних деталях у значній мірі визначається їх адгезійними та трибологічними властивостями. Саме ці властивості забезпечують:

- збереження цілісності «метал–покриття–підшипник» при дії змінних механічних та теплових навантажень;
- стабільність натягу в посадці при тривалому навантаженні;
- обмеження інтенсивності зносу та запобігання розвитку контактних пошкоджень у зоні «корпус–покриття–зовнішнє кільце підшипника».

У посадках типу «корпус – підшипник кочення» тонкий полімерний або нанокомпозитний шар працює як компенсаційно-несучий елемент, який одночасно:

- передає радіальні та частково осьові навантаження від зовнішнього кільця підшипника до корпусної деталі;

- формується як проміжний шар із власною мікротопографією, що впливає на контактні тиски і характер мікроковзання;
- бере участь у тепловому балансі вузла, відводячи тепло від підшипника до металевого корпусу [87-90].

Тому вимоги до матеріалу покриття не обмежуються лише високою міцністю чи модулем пружності. Від нього одночасно очікується:

- висока адгезійна міцність до сталі корпусної деталі;
- достатня когезійна міцність і тріщиностійкість, щоб руйнування не відбувалося в тонкому шарі;
- сприятлива трибологічна поведінка (контрольований коефіцієнт тертя, низька інтенсивність зносу, відсутність схильності до задирів і схоплювання);
- термостійкість і термостабільність адгезійних та трибологічних характеристик.

2.3.1. Адгезійна взаємодія «полімерне покриття – металевий корпус»

Адгезійна міцність полімерного покриття до металевої основи є критичним параметром для всіх технологій відновлення посадочних отворів. У випадку еластомерних матеріалів типу Ф-40 відшарування покриття від сталі приводить до:

- втрати натягу і появи «люфту» в посадці;
- локальної концентрації напружень на краях зон відриву;
- прискореного розвитку втомних пошкоджень та руйнування вузла.

Експериментальні дослідження еластомеру Ф-40 показали, що в ненаповненому стані його адгезійна міцність зв'язку зі сталлю становить близько 3310 Н/м, що відповідає «базовому» рівню для досліджуваної системи. При цьому теплостійкість такого покриття обмежена температурою ≈ 100 °С, а коефіцієнт теплопровідності є типовим для органічних полімерів ($\lambda \approx 0,56$ Вт/(м·К)) [91-93].

Наповнення еластомерної матриці Ф-40 металевими наночастинками алюмінію та міді призводить до істотної зміни характеру міжфазної взаємодії «полімер – метал»:

- у приповерхневій зоні формуються сітчасті утворення з наночастинок у полімерних ланцюгах, що знижує молекулярну рухливість і підвищує структурованість полімеру;
- на поверхні металу та наночастинок реалізуються додаткові фізико-хімічні зв'язки, що підсилюють механізм зчеплення;
- збільшення теплопровідності покриття сприяє вирівнюванню температурного поля, зменшуючи термічні напруження в межах адгезійного контакту [94-96].

За результатами активного експерименту й регресійного аналізу встановлено оптимальний склад нанокompозиту: розчин еластомер Ф-40 – 100 мас. ч., нанопорошок Al – 2,0 мас. ч., нанопорошок Cu – 1,6 мас. ч. Саме при такому співвідношенні наповнювачів адгезійна міцність покриття до сталі досягає 9560 Н/м, що більш ніж у 2,8 рази перевищує показник ненаповненого еластомеру (3310 Н/м), а порівняно зі складаннями №1 і №3 – у 1,57 та 1,17 рази відповідно.

Таблиця 2.4 – Адгезійні характеристики еластомеру Ф-40 та нанокompозиту на його основі

Матеріал покриття	Адгезійна міцність до сталі, F, Н/м	Відносна зміна порівняно з Ф-40
Еластомер Ф-40 (матриця)	3310	1,00 (базовий рівень)
Нанокompозит Ф-40 + Al + Cu (раціональний склад)	9560	2,89

На основі цих даних можна стверджувати, що механізм руйнування системи «метал – покриття» при переході до нанокompозиту зміщується від адгезійно контрольованого до когезійно контрольованого: при випробуваннях

руйнування локалізується переважно в об'ємі полімерної фази, тоді як відрив уздовж межі «полімер – метал» істотно ускладнюється.

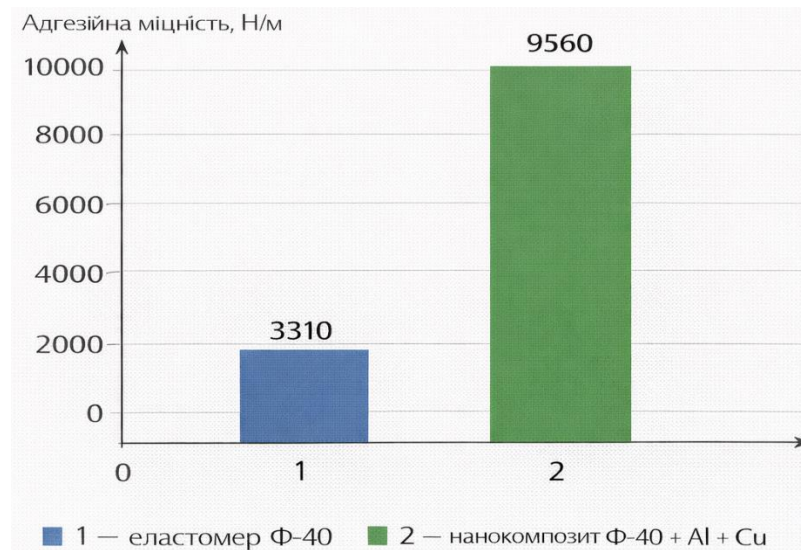


Рисунок 2.5 – Порівняння адгезійної міцності покриттів: 1 – еластомер Ф-40; 2 – нанокompозит Ф-40 + Al + Cu з $F = 3310$ та 9560 Н/м відповідно)

Це є принципово важливим із точки зору довговічності відновлених посадок підшипників.

2.3.2. Вплив теплофізичних властивостей на адгезію та трибологічну поведінку

Полімерні композити традиційно відносять до теплоізоляційних матеріалів: їх коефіцієнт теплопровідності зазвичай становить $0,2\text{--}0,6$ Вт/(м·К), тоді як для сталей та чавунів цей показник сягає десятків Вт/(м·К). Це означає, що заміна металевої посадки на полімерну без спеціальних заходів призводить до погіршення теплового режиму вузла та перегріву контактних зон [97,80,82].

У розробленому нанокompозиті на основі Ф-40 ця суперечність принципово знята за рахунок введення металевих наночастинок:

- теплостійкість нанокompозиту підвищується з 100 до 123 °С (у $1,23$ рази);
- коефіцієнт теплопровідності λ зростає з $0,56$ до $21,8$ Вт/(м·К), тобто у $38,9$ рази;

– зростають коефіцієнти старіння за умовною міцністю ($K\sigma \approx 1,8$) та відносним подовженням ($K\varepsilon \approx 1,4$), що свідчить про підвищену термостійкість.

Це напряду впливає на адгезійні та трибологічні характеристики:

– вирівнювання температурного поля зменшує термічні розтягнення/стиснення на межі «метал – полімер», отже – знижує термічні напруження в адгезійному контакті;

– зниження локальних перегрівів у зоні контакту «зовнішнє кільце підшипника – полімерне покриття» зменшує швидкість термодеструкції полімерної фази та інтенсивність зносу;

– підвищена теплопровідність сприяє стабілізації в'язкості мастильного матеріалу в зоні контакту, що є важливим трибологічним фактором.

Таблиця 2.5 – Узагальнений вплив теплопровідності та теплостійкості на адгезію та трибологічні властивості покриттів

Параметр	Еластомер Ф-40	Наноккомпозит Ф-40 + Al + Cu	Вплив на адгезію й трибологію
Теплостійкість, °С	≈ 100	≈ 123	Менший ризик термічного відшарування
Теплопровідність λ , Вт/(м·К)	0,56	21,8	Кращий відвід тепла, менші локальні перегриви
$K\sigma$, $K\varepsilon$	1,0 (базовий рівень)	$\approx 1,8$; $\approx 1,4$	Повільніше термостаріння, стабільні деформаційні властивості
Адгезія до сталі F, Н/м	3310	9560	Стійкіший адгезійний контакт

У сукупності це формує термомеханічно узгоджену систему «метал – наноккомпозит – підшипник», у якій зменшується ризик як адгезійного, так і трибологічного руйнування.

2.3.3. Трибологічна поведінка полімерних і нанокompозитних покриттів у вузлах «корпус – підшипник»

З трибологічної точки зору посадка «корпус – підшипник кочення» із полімерним покриттям є контактною парою «сталь – полімер – сталь», у якій:

- полімерний шар безпосередньо контактує із зовнішнім кільцем підшипника;
- контакт, як правило, працює в умовах змішаного тертя (граничне + гідродинамічне або еластогідродинамічне) з використанням мастильного матеріалу;
- мікронерівності поверхні металу та полімеру, а також еластичність шару визначають реальну площу контакту та розподіл тисків.

У разі традиційних полімерних покриттів (без нанопаповнення) основні трибологічні проблеми пов'язані з:

- підвищеною інтенсивністю зносу при локальних перегрівках;
- низькою теплопровідністю шару, внаслідок чого температура в контактній зоні зростає швидше, ніж у металі корпусу;
- погіршенням механічних властивостей при термостарінні та, як наслідок, підвищенням схильності до мікропошкоджень [98-100].

Для нанокompозиту на основі Ф-40 трибологічна поведінка суттєво покращується за рахунок комплексної дії:

1. Підвищеної жорсткості та тріщиностійкості шару. Зростання модуля пружності до 1,65 рази і високий рівень питомої роботи руйнування (12,9 МДж/м³) забезпечують здатність покриття сприймати локальні піки тиску без розвитку глибоких тріщин і відшарувань.

2. Значно кращого тепловідведення. Підвищений коефіцієнт теплопровідності ($\lambda = 21,8 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) дозволяє ефективно відводити тепло від зони контакту «підшипник – покриття», що зменшує термічну деградацію полімеру й мастильного шару.

3. Стабільності властивостей при тривалому навантаженні. Підвищені значення $K\sigma$ і $K\epsilon$ свідчать про те, що наноккомпозит не втрачає несучу здатність і деформативність із плином часу, що критично для втомних трибологічних процесів.

Трибологічний ефект нових покриттів підтверджується стендовими дослідженнями довговічності посадок підшипників, відновлених наноккомпозитом еластомеру Ф-40. Показано, що наповнення еластомеру металевими наночастинками підвищує витривалість матеріалу і, відповідно, довговічність відновлених посадок підшипників при циклічному радіальному навантаженні, причому існує оптимальний діапазон товщин покриття, в межах якого ресурс вузла максимальний [101,67,94-96].

Максимальна допустима товщина покриття еластомеру Ф-40 становить 0,1 мм, а його наноккомпозиту – 0,125 мм, що відображено на експериментальній залежності «ресурс t – товщина покриття h ». При перевищенні цих значень збільшення товщини шару призводить до небажаного зменшення жорсткості й зростання деформацій, що погіршує трибологічні умови роботи вузла.

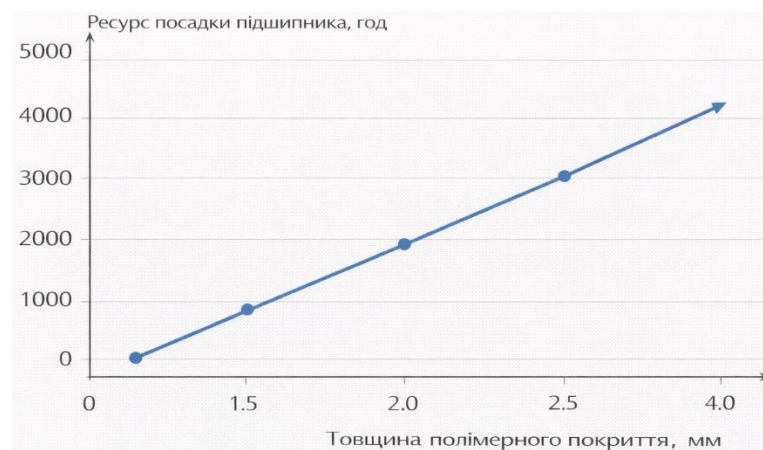


Рисунок 2.6 – Залежність ресурсу t посадки підшипника від товщини полімерного покриття h для наноккомпозиту на основі Ф-40 (за результатами стендових випробувань)

Це узгоджується з уявленнями про те, що надто товстий полімерний шар має знижену жорсткість, що підсилює мікроковзання в зоні контакту та сприяє прискореному зносу [102].

Особливістю розробленої технології є також обмеження на діаметральний знос отворів, які доцільно відновлювати нанокompозитом. За результатами досліджень рекомендується відновлювати посадочні отвори з діаметральним зносом до 0,25 мм, для яких товщина полімерного шару не перевищує зазначеного оптимального діапазону.

2.3.4. Узагальнена оцінка адгезійних і трибологічних переваг нанокompозиту на основі Ф-40

На основі проведеного аналізу можна сформулювати такі узагальнені положення щодо адгезійних і трибологічних властивостей матеріалів для відновлення деталей:

1. Еластомер Ф-40 у ненаповненому стані забезпечує базовий рівень адгезійної міцності (≈ 3310 Н/м) і деформаційно-міцнісних характеристик, достатніх для роботи в помірно навантажених вузлах, однак його теплостійкість і теплопровідність обмежують застосування в теплонавантажених посадках підшипників.

2. Нанокompозит на основі Ф-40 з наночастинками Al і Si забезпечує суттєве зростання адгезійної міцності до сталі (до 9560 Н/м), що більш ніж утричі перевищує показник матриці й переводить систему в режим когезійно контрольованого руйнування.

3. Завдяки багаторазовому підвищенню теплопровідності (у 38,9 рази) і зростанню теплостійкості до 123 °С зменшується ризик термічного відшарування покриття та інтенсфікації зносу в зоні контакту, що є ключовим трибологічним фактором.

4. Підвищені значення коефіцієнтів старіння $K\sigma$ і $K\varepsilon$ свідчать про термостійкість деформаційно-міцнісних властивостей, що забезпечує стабільність як адгезійного, так і трибологічного стану вузла впродовж усього періоду експлуатації.

5. Результати стендових випробувань довговічності посадок підшипників підтверджують практичну реалізацію теоретично очікуваних

переваг.напокомполит на основі еластомеру Ф-40 забезпечує збільшення ресурсу вузла при оптимальній товщині покриття (до 0,125 мм) і рекомендований для відновлення отворів із діаметральним зносом до 0,25 мм.

6. Сукупність адгезійних і трибологічних переваг розробленого нанокомполиту формує науково обґрунтовану базу для його впровадження в технології відновлення посадок підшипників у корпусних деталях сільськогосподарської техніки, що відображено в структурі об'єкта та предмета дослідження й становить одне з основних положень дисертаційної роботи, винесених на захист [103,76,93].

Таким чином, адгезійні та трибологічні властивості нанокомполиту на основі еластомеру Ф-40 виступають ключовими факторами підвищення ефективності технології відновлення корпусних деталей. У поєднанні з покращеними деформаційно-міцнісними та теплофізичними характеристиками вони забезпечують якісно новий рівень надійності та ресурсу посадок підшипників кочення в умовах реальної експлуатації сільськогосподарських машин.

2.4. Тепло- та термостійкість, теплопровідність нанокомполитів

Тепловий стан посадок підшипників у корпусних деталях є одним з ключових чинників, що визначають їхню довговічність і надійність. У типовому вузлі трансмісії сільськогосподарської машини теплота генерується в зоні контакту елементів кочення з доріжками підшипника, частково в мастильному шарі та передається через зовнішнє кільце до корпусної деталі. У традиційних конструкціях роль теплопровідного шляху відіграє суцільний металевий контакт «підшипник – корпус», тоді як при відновленні посадки полімерним або нанокомполитним матеріалом між металевими елементами з'являється додатковий прошарок з іншими теплофізичними характеристиками, який може працювати або як тепловий бар'єр, або як керований теплопровідний елемент.

Більшість полімерів, що застосовуються в техніці, за своїми теплофізичними характеристиками є ефективними теплоізоляторами: їхній коефіцієнт теплопровідності зазвичай не перевищує 0,2–0,6 Вт/(м·К), що на порядки нижче, ніж у конструкційних сталей та чавунів [104-106].

Це означає, що без спеціальних заходів введення полімерного шару у вузол «корпус – підшипник» неминуче погіршує тепловідведення й сприяє локальному перегріву. З іншого боку, саме полімерні матеріали здатні забезпечити необхідні компенсаційні та демпфувальні властивості, потрібні для високонавантажених посадок. У цьому контексті нанокомпозити на основі еластомерів розглядаються як структура, яка дозволяє одночасно зберегти переваги полімерів (еластичність, демпфування, адгезія) й цілеспрямовано скоригувати їхні теплофізичні властивості до рівня, наближеного до металічних систем.

У розробленому нанокомпозиті на основі еластомеру Ф-40, наповненому нанопорошками алюмінію та міді, реалізується саме такий підхід: металеві наночастинки формують у полімерній матриці сітчасту теплопровідну структуру, у якій міжфазний шар відіграє не лише зміцнювальну, а й теплопровідну роль.

У результаті композитний матеріал перестає поводитися як типова органічна теплоізоляція й набуває здатності інтенсивно відводити тепло від підшипника до корпусної деталі за збереження еластомерного характеру деформування.

2.4.1. Поняття теплостійкості та термостійкості полімерних нанокомпозитів

Для полімерних та нанокомпозитних матеріалів доцільно розрізняти теплостійкість та термостійкість. Під теплостійкістю в контексті даної роботи розуміють максимальну температуру експлуатації, за якої матеріал зберігає заданий рівень механічних властивостей (умовної міцності, модуля пружності, відносного подовження). Термостійкість характеризує здатність матеріалу

зберігати деформаційно-міцнісний комплекс у часі при тривалому тепловому впливі й оцінюється через коефіцієнти старіння за міцністю K_σ та відносним подовженням K_ϵ [107, 69, 75, 81].

Термодеструкція еластомерних матеріалів, зокрема на основі бутадієн-нітрильного каучуку, має радикально-ланцюговий характер і супроводжується:

- розривом слабких хімічних зв'язків у макромолекулярному ланцюзі;
- утворенням вільних радикалів і продуктів термоокиснювального розпаду;
- зменшенням молекулярної маси й щільності поперечних зв'язків;
- погіршенням пружно-пластичних характеристик (зниженням σ_b , ϵ_b , A).

У ненаповненому стані еластомер Ф-40 демонструє обмежену теплостійкість (≈ 100 °C), за якої починаються інтенсивні процеси термодеструкції, що проявляється у зниженні міцності, збільшенні залишкових деформацій та зростанні швидкості старіння.

Введення металевих наночастинок алюмінію та міді, як показали експериментальні дослідження, змінює характер термодеструкції:

- міжфазний шар навколо наночастинок, сформований за рахунок специфічної взаємодії полярних фрагментів полімеру з металевою поверхнею, має зменшену молекулярну рухливість, що підвищує енергію активації термодеструктивних процесів;
- армувальний ефект наночастинок перешкоджає розвитку мікродефектів, які могли б стати центрами локалізації теплового та механічного пошкодження;
- збільшена теплопровідність композиту знижує рівень локального перегріву в матеріалі [108-110].

У сукупності це веде до зростання теплостійкості нанокompозиту та підвищення термостійкості його деформаційно-міцнісних характеристик.

2.4.2. Експериментальна оцінка теплостійкості та термостійкості нанокompозиту на основі Ф-40

У ході дослідження були отримані кількісні показники теплостійкості еластомеру Ф-40 та нанокompозиту на його основі. Встановлено, що:

- теплостійкість ненаповненого еластомеру Ф-40 становить близько 100 °С;
- теплостійкість нанокompозиту із оптимальним вмістом нанопорошків (Ф-40 – 100 мас. ч., Al – 2,0 мас. ч., Cu – 1,6 мас. ч.) складає 123 °С, тобто зростає в 1,23 рази порівняно з матрицею.

Термостійкість оцінювали за коефіцієнтами старіння K_σ та K_ε , які визначали як відношення відповідно умовної міцності та відносного подовження після термостаріння до їх початкових значень. Для еластомеру Ф-40 ці коефіцієнти приймаються за базовий рівень ($\approx 1,0$), тоді як для нанокompозиту:

- $K_\sigma \approx 1,8$ – за міцністю;
- $K_\varepsilon \approx 1,4$ – за відносним подовженням.

Це означає, що після дії підвищених температур нанокompозит не лише зберігає, а в окремих випадках навіть покращує свої деформаційно-міцнісні характеристики, що свідчить про стабілізацію структури матеріалу в процесі термообробки/термоексплуатації.

Таблиця 2.6 – Показники теплостійкості та термостійкості еластомеру Ф-40 і нанокompозиту на його основі

Матеріал	Теплостійкість, °С	K_σ (після термовпливу)	K_ε (після термовпливу)
Еластомер Ф-40 (матриця)	≈ 100	$\approx 1,0$ (базовий рівень)	$\approx 1,0$
Нанокompозит Ф-40 + Al + Cu	≈ 123	$\approx 1,8$	$\approx 1,4$

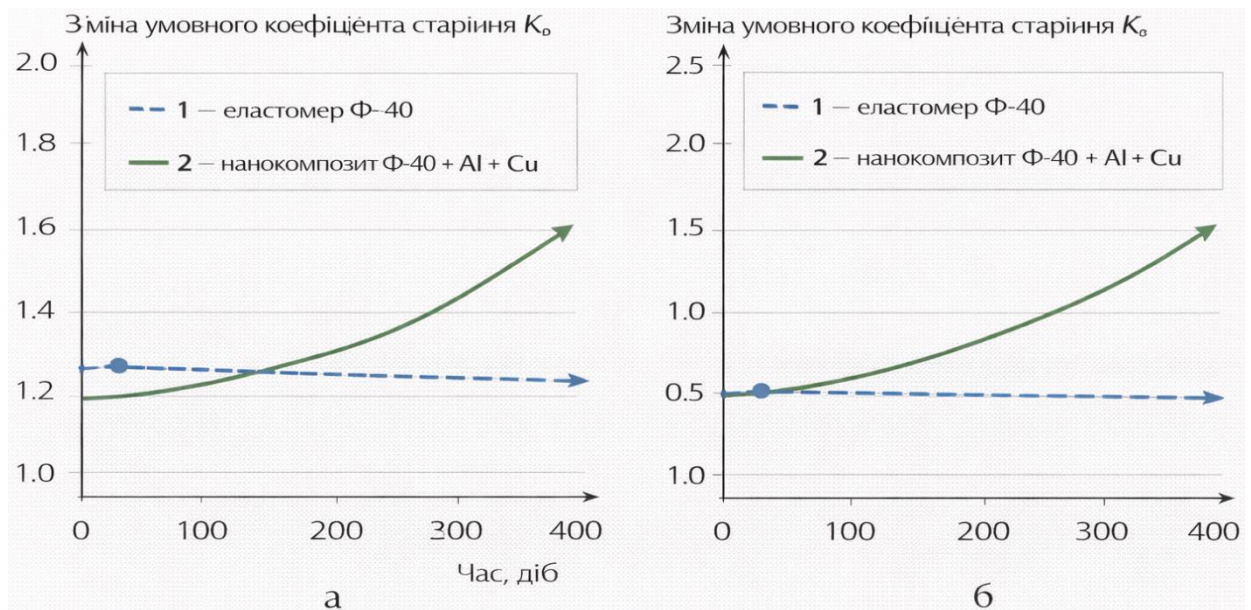


Рисунок 2.7 – Зміна коефіцієнтів старіння K_{σ} та K_{ε} еластомеру Ф-40 (крива 1) і нанокompозиту (крива 2) залежно від тривалості термостаріння

2.4.3. Теплопровідність нанокompозитів та механізми її підвищення

Ключовою особливістю розробленого нанокompозиту є радикальне зростання коефіцієнта теплопровідності порівняно з еластомерною матрицею. Для ненаповненого еластомеру Ф-40 коефіцієнт теплопровідності становить

$$\lambda_{\text{Ф-40}} \approx 0,56 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{год}),$$

що відповідає рівню типових органічних полімерів. Для нанокompозиту на основі Ф-40 з нанопорошками Al і Cu цей показник становить

$$\lambda_{\text{нк}} = 21,8 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{год}),$$

тобто теплопровідність зростає у 38,9 рази порівняно з матрицею [111-113].

Таблиця 2.7 – Коефіцієнт теплопровідності еластомеру Ф-40 та нанокompозиту на його основі

Матеріал	λ , Вт/(м·К)	Відносна зміна λ
Еластомер Ф-40	0,56	1,0 (базовий рівень)
Нанокompозит Ф-40 + Al + Cu	21,8	$38,9 \cdot \lambda_{\text{Ф-40}}$

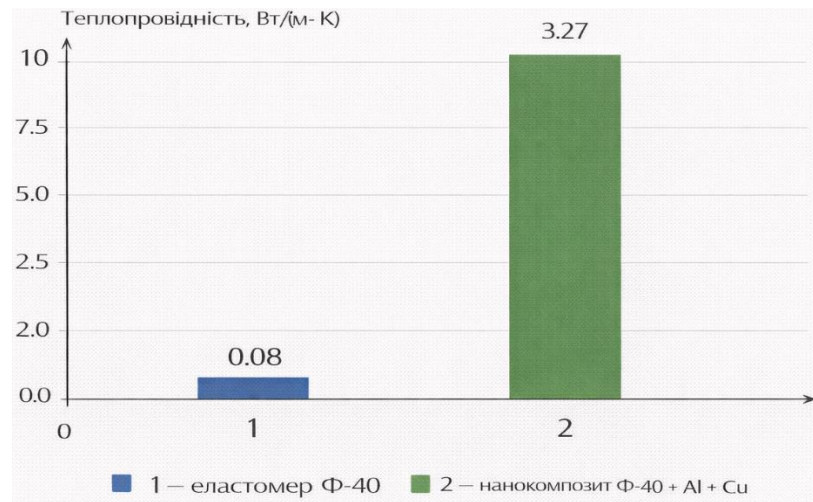


Рисунок 2.8 – Порівняння теплопровідності еластомеру Ф-40 та нанокompозиту на його основі

Причини настільки значного зростання теплопровідності полягають у мікроструктурі нанокompозиту:

1. Формування перколяційної мережі наночастинок. Металеві наночастилки Al і Cu при оптимальній концентрації не просто розподіляються ізольовано, а утворюють частково зв'язані ланцюги й кластери, що забезпечують утворення теплопровідних «містків» крізь полімерну матрицю.

2. Внесок міжфазного шару. Міжфазні області навколо наночастинок мають змінену (зазвичай більш щільну й орієнтовану) структуру полімеру, яка може сприяти більш ефективному перенесенню енергії коливань (фононів), ніж у «вільній» матриці.

3. Покращення контакту з металевією основою й підшипником. Завдяки підвищеній адгезії та структурованості приповерхневих зон нанокompозит забезпечує кращий тепловий контакт із металевими поверхнями, що зменшує температурний опір на межі «метал – полімер».

У сумі ці фактори дозволяють нанокompозиту на основі Ф-40 фактично перейти з класу «теплоізолюючих полімерів» до класу «теплопровідних композитів», зберігаючи водночас еластомерні й деформаційно-демпфувальні властивості.

2.4.4. Вплив теплофізичних властивостей нанокompозиту на тепловий стан вузла «корпус – підшипник»

З погляду конструктора й експлуатанта найважливішим є не стільки абсолютне значення λ чи теплостійкості, скільки реальний вплив цих параметрів на температуру та напружений стан вузла. У вузлі «корпус – підшипник» полімерний/нанокompозитний шар виконує роль елемента, через який відбувається передача тепла від зовнішнього кільця підшипника до корпусної деталі [114-116,104].

У разі застосування теплоізолюючого полімерного шару (ненаповнений еластомер) спостерігається:

- підвищення температури зовнішнього кільця підшипника;
- перегрів мастильного матеріалу в зоні контакту;
- прискорене термостаріння полімерного покриття й сталевих елементів;
- зростання ризику руйнування мастильної плівки й переходу до граничного тертя з підвищеним зносом.

Використання нанокompозиту на основі Ф-40 із $\lambda = 21,8$ Вт/(м·К) принципово змінює картину: полімерний шар перестає бути тепловим бар'єром, а стає ефективним елементом теплопередачі, наближаючи теплову поведінку вузла до металічної. Розрахункові й експериментальні дослідження свідчать, що це дозволяє знизити робочу температуру підшипникового вузла і стабілізувати температурний режим при тривалій роботі.

Для пояснення цього ефекту доцільно використати спрощену одномірну модель теплопровідності через шар товщиною h , який знаходиться між двома металевими елементами з температурами T_1 (підшипник) і T_2 (корпус). Тепловий потік через шар визначається законом Фур'є:

$$q = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{h}.$$

При переході від матриці до нанокompозиту коефіцієнт λ зростає майже у 40 разів, а товщина шару h (для відновлених отворів із діаметральним зносом до 0,25 мм) залишається в межах оптимальних значень (до 0,1–0,125 мм).

Відповідно, тепловий потік q збільшується пропорційно, що веде до більш інтенсивного відведення тепла й зниження різниці температур між підшипником і корпусом [117-120,111].

З точки зору експлуатації це означає:

- зменшення температурних градієнтів у зоні контакту;
- зниження термічних напружень, які можуть викликати адгезійне відшарування;
- збільшення ресурсу мастильного шару та зменшення інтенсивності зносу.

2.4.5. Взаємозв'язок теплофізичних характеристик із довговічністю відновлених посадок

Тепло- та термостійкість, а також теплопровідність нанокompозиту на основі Ф-40 слід розглядати не ізольовано, а в тісному зв'язку з його деформаційно-міцнісними та адгезійними властивостями. Саме сукупність цих характеристик визначає ресурс відновленого вузла:

- підвищена теплостійкість (123 °С) гарантує, що в робочому діапазоні температур матеріал не втрачатиме несучу здатність;
- високі коефіцієнти старіння K_{σ} і K_{ϵ} свідчать про здатність зберігати міцність і деформативність при тривалому нагріванні;
- зростання λ до 21,8 Вт/(м·К) забезпечує інтенсивний тепловідвід і зменшує ймовірність термічного руйнування як полімерної фази, так і мастильного шару;
- підвищена адгезійна міцність (до 9560 Н/м) у поєднанні з поліпшеним тепловим режимом мінімізує ризик відшарування покриття.

Стендові випробування, проведені для посадок підшипників, відновлених нанокompозитом, підтвердили, що за оптимальної товщини покриття (до 0,125 мм) ресурс вузла істотно зростає, а характер руйнування зміщується від адгезійно-контрольованого до когезійного з розвитком пошкоджень переважно в об'ємі матеріалу за відсутності масового відшарування від металу [121-124, 116].



Рисунок 2.9 – Узагальнена схема впливу теплофізичних характеристик нанокompозиту на ресурс вузла «корпус – підшипник»

Отже, в результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень встановлено, що нанокompозит на основі еластомеру Ф-40 з наночастинками Al і Cu має комплекс теплофізичних властивостей, який принципово відрізняє його від традиційних полімерних матеріалів:

- теплостійкість підвищена до 123 °С;
- термостійкість деформаційно-міцнісних характеристик підтверджена значеннями $K_{\sigma} \approx 1,8$ та $K_{\varepsilon} \approx 1,4$;
- коефіцієнт теплопровідності зростає у 38,9 рази (до 21,8 Вт/(м·К)), що переводить матеріал у клас теплопровідних композитів.

Цей комплекс властивостей, у поєднанні з покращеними деформаційно-міцнісними й адгезійними характеристиками, формує науково обґрунтовані тепло- та термостійкі передумови для підвищення ефективності технології відновлення корпусних деталей сільськогосподарської техніки, що надалі підтверджується результатами експериментальних досліджень та виробничих випробувань, розглянутих у наступних розділах дисертаційної роботи.

2.5. Вплив нанорозмірних наповнювачів на експлуатаційні властивості покриттів

Експлуатаційні властивості полімерних покриттів, що застосовуються для відновлення посадочних отворів під підшипники в корпусних деталях сільськогосподарської техніки, визначаються сукупністю деформаційно-міцнісних, адгезійних, теплофізичних і трибологічних характеристик, а також здатністю покриття зберігати ці властивості в умовах тривалого термовпливу, циклічного навантаження та механічного контакту під час обробки й експлуатації [125, 121-123].

Введення в еластомерну матрицю нанорозмірних наповнювачів – у даному випадку нанопорошків алюмінію та міді – призводить не до простого «зміцнення» матеріалу, а до структурної перебудови композиту на мікро- і нанорівні. Це зумовлює комплексні зміни експлуатаційних властивостей покриттів: підвищення модуля пружності та питомої роботи руйнування, зростання адгезійної міцності до металу, істотне збільшення теплопровідності та теплостійкості, поліпшення довговічності відновлених посадок підшипників, а також зниження пошкоджуваності покриттів у процесі їх калібрування та експлуатації.

2.5.1. Структурні особливості наномодифікованого покриття та базові механізми впливу наповнювачів

При введенні металевих наночастинок у полімерну матрицю еластомеру Ф-40 формуються сітчасті утворення наночастинок у полімерних ланцюгах, що супроводжується зниженням молекулярної рухливості макроланцюгів, збільшенням ефективної густини поперечних зв'язків та формуванням розгалуженої міжфазної структури.

У таких умовах наночастинок виконують подвійну роль:

– як армувальні елементи, що перешкоджають розвитку мікрodefektів і локалізації деформацій;

– як теплопровідні включення, які формують у матриці перколяційну теплопровідну мережу.

Міжфазний шар навколо наночастинок алюмінію та міді є ділянкою з модифікованою структурою полімеру – з підвищеною орієнтацією ланцюгів, іншою густиною поперечних зв'язків і зменшеною рухливістю сегментів. Саме ця зона суттєво впливає на:

- деформаційно-міцнісні характеристики (зростання модуля пружності, питомої роботи руйнування);
- теплостійкість і термостійкість (підвищення енергії активації процесів термодеструкції);
- адгезійну взаємодію з металевою основою (покращення механічного «зачеплення» та реалізація додаткових фізико-хімічних зв'язків).

Схематично будову нанокомпозиту можна подати як еластомерну матрицю з рівномірно розподіленими металевими наночастинками, частина яких утворює перколяційну сітку, що визначає одночасно механічну та теплопровідну поведінку матеріалу.

2.5.2. Багатофакторна оптимізація складу нанокомпозиту та характер впливу вмісту наночастинок

Для кількісного оцінювання впливу вмісту наночастинок алюмінію (X_1) та міді (X_2) на експлуатаційні властивості покриттів проведено багатофакторний активний експеримент за композиційним планом B_2 . Як функцію відгуку Y обрано питому роботу руйнування α_p , МДж/м³, що інтегрально характеризує енергомісткість руйнування плівок нанокомпозиту й тісно пов'язана з тріщиностійкістю та втомною довговічністю матеріалу.

У ролі незалежних факторів використано:

- X_1 – вміст наночастинок Al, мас. год.;
- X_2 – вміст наночастинок Cu, мас. год.

Для дослідження адгезійних властивостей відібрано три основні композиції:

- Склад №1: Ф-40 – 100 мас. ч.; Al – 1,0 мас. ч.; Cu – 0,6 мас. год.;
- Склад №2: Ф-40 – 100 мас. ч.; Al – 2,0 мас. ч.; Cu – 1,6 мас. год.;
- Склад №3: Ф-40 – 100 мас. ч.; Al – 3,0 мас. ч.; Cu – 2,6 мас. год.

Адгезію полімерних матеріалів оцінювали за міцністю зв'язку при відшаруванні зразків, нанесених на сталеві пластини зі сталі 45 (розміри 100×25×3 мм, шорсткість Ra 0,63), причому покриття формували пошарово з використанням металевої сітки як елемента закріплення шару [126,124].

За результатами активного експерименту побудовано регресійну модель залежності $\alpha_p = f(X_1, X_2)$, яка має характер поверхні з чітко вираженим максимумом у околі складу №2. Це свідчить про наявність оптимальної концентрації наночастинок, при якій досягається баланс між ефектом армування й ризиком агломерації частинок:

- при недостатньому вмісті наповнювачів сітчасті структури не формуються, і ефект наномодифікування виражений слабо;
- при надмірному вмісті частинок можливим є утворення агломератів, локальних концентрацій напружень і зниження тріщиностійкості.

Таблиця 2.8 – Досліджувані склади нанокompозиту та характер впливу вмісту Al і Cu на експлуатаційні властивості (узагальнення експерименту)

Склад	Вміст Al, мас. год.	Вміст Cu, мас. год.	Характерні особливості впливу на властивості
№1	1,0	0,6	Початкове зростання модулю та адгезії, але без формування повноцінної сітчастої структури; покращення властивостей обмежене.
№2	2,0	1,6	Формування розвиненої наноструктури; максимум α_p , адгезії та модуля пружності; суттєве підвищення теплопровідності й теплостійкості.
№3	3,0	2,6	Подальше збільшення вмісту наповнювачів не дає пропорційного приросту властивостей; спостерігається тенденція до їх стабілізації

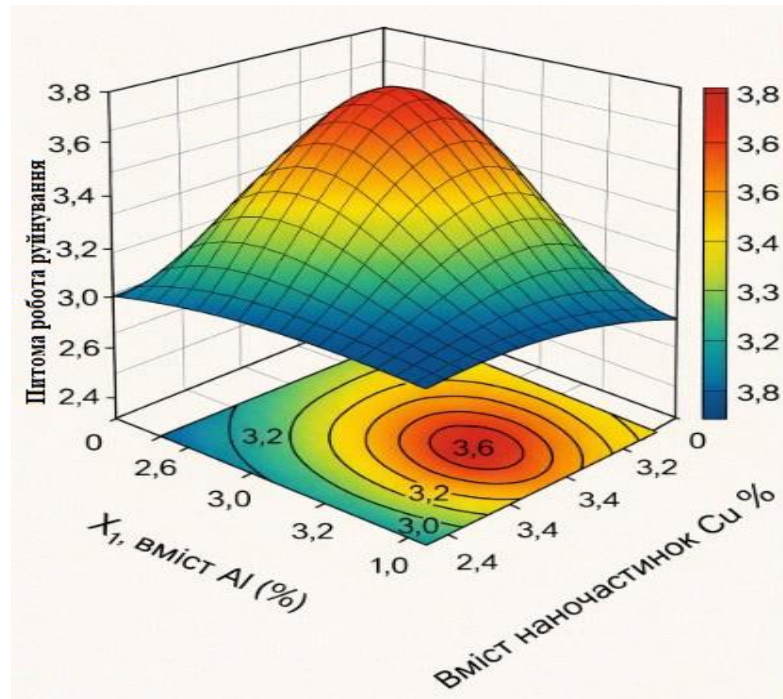


Рисунок 2.12 – Поверхня відгуку та ізолінії залежності питомої роботи руйнування α_p від вмісту наночастинок Al (X_1) та Cu (X_2)

На основі регресійного аналізу та порівняння з експериментальними даними прийнято оптимальний склад нанокompозиту: Ф-40 – 100 мас. ч., Al – 2,0 мас. ч., Cu – 1,6 мас. ч. Саме він забезпечує максимум питомої роботи руйнування ($\approx 12,9$ МДж/м³), зростання модуля пружності в 1,65 рази та збільшення адгезійної міцності до металу в 2,89 рази порівняно з ненаповненим еластомером.

2.5.3. Зміна комплексу експлуатаційних характеристик під дією нанопаповнювачів

Комплексний вплив нанорозмірних паповнювачів на властивості матеріалу узагальнено в даних, наведених у табл. 1.5, де проведено порівняльний аналіз основних експлуатаційних характеристик еластомеру Ф-40 та нанокompозиту на його основі. На основі цих результатів сформовано табл. 2.9, яка відображає інтегральну оцінку змін властивостей матеріалу під дією нанопаповнювачів.

Таблиця 2.9 – Вплив нанорозмірних наповнювачів Al і Cu на основні експлуатаційні характеристики покриттів (на основі табл. 1.5)

Показник	Ф-40 (матриця)	Наноккомпозит Ф- 40 + Al + Cu	Зміна показника
Умовна теплостійкість, °С	≈ 100	≈ 123	+ 23 %
Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К)	0,56	21,8	у 38,9 рази ↑
Адгезійна міцність до сталі, Н/м	3310	9560	у 2,89 рази ↑
Питома робота руйнування, МДж/м ³	< 12,9	≈ 12,9	істотне зростання енергомісткості
К σ (термостійкість за міцністю)	1,0 (базове)	≈ 1,8	у 1,8 рази ↑
К ϵ (термостійкість за подовженням)	1,0 (базове)	≈ 1,4	у 1,4 рази ↑

Таким чином, наночастинки Al і Cu формують якісно новий рівень експлуатаційних характеристик покриття:

- змінюють механічну відповідь матеріалу з «м'якоеластомерної» до «еластомерно-армованої»;
- підвищують опір руйнуванню при ударно-вібраційних навантаженнях;
- забезпечують високий рівень адгезії до сталевій основі;
- переводять матеріал із класу теплоізоляторів до класу теплопровідних композитів.

Як видно з рисунка 2.13, наноккомпозит на основі еластомеру Ф-40 з наночастинками Al та Cu характеризується суттєво кращими нормованими експлуатаційними показниками порівняно з ненаповненою полімерною матрицею. Найбільш виражене зростання спостерігається для коефіцієнта теплопровідності λ та адгезійної міцності $F_{адг}$, що зумовлює покращення тепловідведення та надійності зчеплення покриття з металевою основою. Підвищення питомої роботи руйнування Асвідчить про зростання

енергоємності процесу руйнування та підвищену тріщиностійкість нанокompозиту.

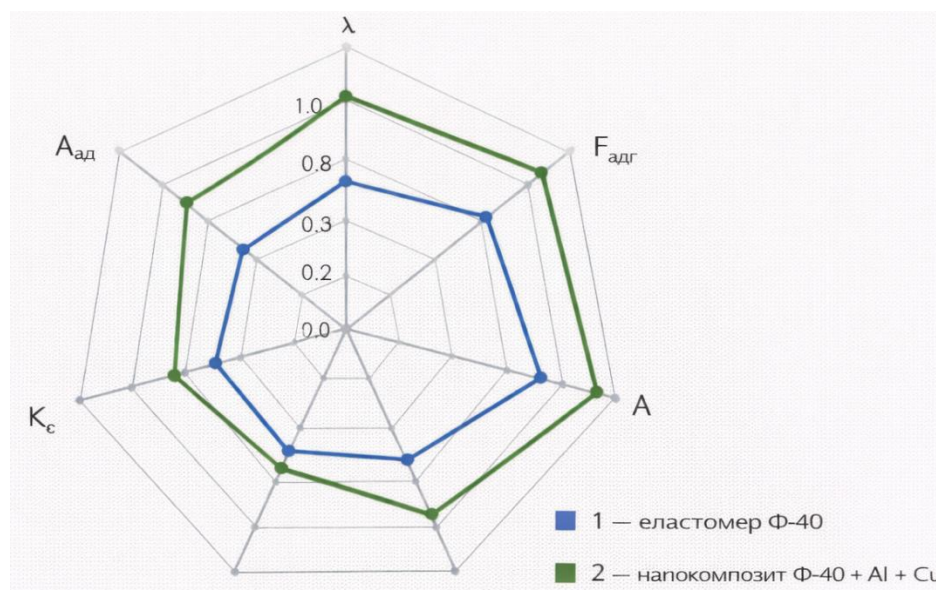


Рисунок 2.13 – Радіальна діаграма порівняння експлуатаційних властивостей Ф-40 і нанокompозиту (нормовані значення λ , $F_{адг}$, A , K_σ , K_ϵ)

Значення коефіцієнтів старіння K_σ і K_ϵ для нанокompозиту мають більш сприятливий характер, що вказує на підвищену стабільність механічних властивостей за умов термовпливу. Узагальнення цих результатів підтверджує комплексний позитивний вплив нанонаповнювачів на експлуатаційні властивості матеріалу та обґрунтовує доцільність застосування нанокompозитного покриття у вузлах типу «корпус – підшипник».

2.5.4. Вплив нанорозмірних наповнювачів на технологічну пошкоджуваність та точність покриттів

Експлуатаційні властивості покриттів проявляються не лише в роботі відновленого вузла, а й у технологічних операціях їх обробки, зокрема при калібруванні отворів з полімерним покриттям спеціальними калібрами-різцями. У процесі калібрування можливе локальне руйнування поверхневого шару покриття, виникнення тріщин, відшарувань та геометричних дефектів (овальність, відхилення розміру).

Дослідження показали, що використання нанокompозиту на основі еластомеру Ф-40 забезпечує зменшення площі руйнування покриття при раціональному виборі геометричних параметрів ріжучого інструменту. Зокрема, калібр із переднім кутом $\gamma = 70^\circ$ забезпечує найвищу якість обробки:

- площа руйнування покриття зменшується в 2,6 і 2,0 рази порівняно з калібрами з $\gamma = 50^\circ$ і 60° ;
- овальність отвору з полімерним покриттям зменшується у 1,75 і 1,5 рази (до 8 мкм);
- відхилення від заданого розміру Δ зменшується в 1,67 і 1,39 рази (до $\Delta = 18$ мкм).

Ці результати свідчать про те, що наномодифіковане покриття краще протистоїть локальним механічним впливам, а його структура забезпечує:

- стійкіший опір вириванню й сколюванню під дією ріжучої кромки;
- зниження концентрації напружень на мікрodefектах;
- вищу технологічну «роботоздатність» (здатність зберігати цілісність при обробці).

Таблиця 2.10 – Вплив геометрії калібру-різця на пошкоджуваність і точність отворів з покриттям нанокompозиту Ф-40 + Al + Cu

Передній кут γ , град.	Відносна площа руйнування покриття	Овальність отвору, мкм	Відхилення Δ , мкм	Порівняльна оцінка якості
50	1,0 (базова)	найбільша	найбільше	незадовільна
60	$\approx 0,5-0,6$ від базової	зменшена	зменшене	задовільна
70	$\approx 0,38-0,4$ від базової	≈ 8 мкм	≈ 18 мкм	найкраща

Таким чином, нанорозмірні наповнювачі не лише покращують «пасивні» характеристики покриття, а й розширюють технологічні можливості його калібрування без втрати цілісності й точності.

2.5.5. Вплив нанорозмірних наповнювачів на довговічність відновлених посадок підшипників

Найбільш переконливо вплив нанорозмірних наповнювачів проявляється в довговічності посадок підшипників, відновлених нанокompозитом. За результатами стендових випробувань довговічності та теплового балансу посадок підшипників 209, відновлених нанокompозитом на основі Ф-40, встановлено:

- наповнення еластомеру Ф-40 металевими наночастинками підвищує витривалість матеріалу й відповідно довговічність відновлених посадок підшипників у корпусній деталі при циклічному радіальному навантаженні до 20 кН;

- максимальна допустима товщина покриття еластомеру Ф-40 становить 0,10 мм, тоді як для нанокompозиту – 0,125 мм без істотного зниження ресурсу;

- нанокompозитом на основі еластомеру Ф-40 рекомендується відновлювати зношені посадочні отвори з діаметральним зносом до 0,25 мм.

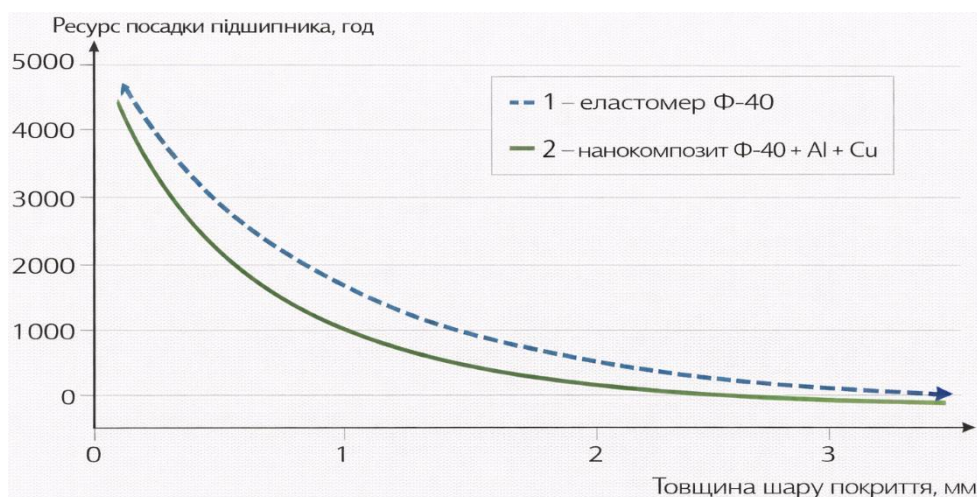


Рисунок 2.14 – Залежність ресурсу t полімерних посадок підшипника від товщини шару покриття для еластомеру Ф-40 та нанокompозиту на його основі

Таким чином, нанорозмірні наповнювачі Al і Cu забезпечують:

- підвищення несучої здатності покриття за рахунок зростання модуля пружності та тріщиностійкості;

- зменшення термічного навантаження завдяки різкому збільшенню теплопровідності й теплостійкості;
- стабільність адгезійного контакту «метал – покриття» через підвищення адгезійної міцності до 9560 Н/м;
- зниження пошкоджуваності покриття при калібруванні й експлуатації за рахунок більш сприятливого розподілу напружень і підвищеної опірності локальним механічним впливам.

Узагальнюючи, можна констатувати, що введення нанорозмірних наповнювачів до еластомерної матриці Ф-40 формує комплексний експлуатаційний ефект, який поєднує:

- підвищення деформаційно-міцнісних характеристик;
- покращення адгезійних і трибологічних властивостей;
- суттєве зростання теплопровідності й теплостійкості;
- збільшення довговічності відновлених посадок підшипників.

Цей ефект є науково обґрунтованою основою для вибору оптимального складу нанокompозиту та розроблення технологічних рекомендацій щодо відновлення корпусних деталей сільськогосподарської техніки, які детальніше розглядаються в наступних розділах дисертаційної роботи.

2.6. Теоретичне моделювання процесу відновлення посадкових отворів

Теоретичне моделювання процесу відновлення посадкових отворів корпусних деталей нанокompозитами на основі еластомеру Ф-40 з металевими наночастинками алюмінію та міді є необхідною передумовою для раціонального вибору параметрів технології та прогнозування довговічності відновлених нерозбірних посадок типу «корпус – підшипник». Такий підхід дає змогу узагальнити експериментальні дані, встановити формалізовані залежності між структурно-фазовими, механічними й теплофізичними характеристиками нанокompозиту та напружено-деформованим і тепловим

станом вузла під час експлуатації, а також визначити допустимі інтервали натягу, товщини покриття й режимів калібрування.

Процес відновлення посадкового отвору розглядається як послідовність стадій: підготовка поверхні корпусної деталі, нанесення та формування шару нанокompозиту, полімеризація і стабілізація властивостей матеріалу, розмірне калібрування отвору, складання вузла з підшипником і експлуатаційне навантаження з термоцикуванням. Кожна зі стадій супроводжується суттєвою зміною напружено-деформованого стану і температурного поля, що повинно бути враховано в математичній моделі [127-129, 125].

2.6.1. Постановка задачі моделювання та прийняті припущення

Об'єктом моделювання є циліндрична нерозбірна посадка типу «корпус – шар нанокompозиту – зовнішнє кільце підшипника кочення», в якій знос посадкового отвору корпусної деталі компенсується нанесенням шару нанокompозиту на основі еластомеру Ф-40, наповненого наночастинками Al і Si. Товщина полімерного шару після калібрування, виходячи з технологічних обмежень, не перевищує 0,15 мм, що дає можливість розглядати композитний прошарок як тонку кільцеву вставку між жорсткішим сталевим корпусом і зовнішнім кільцем підшипника.

Для побудови теоретичної моделі приймаються такі основні припущення:

- геометрія вузла – осесиметрична, отвору надається форма ідеального кола, поздовжні деформації незначні, тому розглядається плоский напружений стан (радіально-кільцевий);
- корпусна деталь і зовнішнє кільце підшипника – ізотропні лінійно-пружні матеріали з відомими модулями пружності й коефіцієнтами Пуассона;
- нанокompозит на основі еластомеру Ф-40 з наночастинками Al і Si розглядається як ефективно ізотропний матеріал з еквівалентними модулем пружності, коефіцієнтом Пуассона, коефіцієнтом теплопровідності та іншими

«ефективними» параметрами, що функціонально залежать від об'ємних часток твердих наночастинок;

– контакти «корпус – наноккомпозит» і «наноккомпозит – зовнішнє кільце підшипника» у розрахунках натягу приймаються ідеально адгезійними (відсутність ковзання та зазорів), що відповідає умовам високої адгезійної міцності розробленого наноккомпозиту;

– тепловий режим розглядається у квазістаціонарній постановці: зміни температури в часі порівняно повільні, тому на кожному кроці можна приймати стаціонарний тепловий потік через композитний прошарок;

– усадка при полімеризації враховується у вигляді додаткової «ефективної» компоненти натягу, що накладається на геометричний натяг, сформований калібруванням.

В рамках таких припущень задачі теоретичного моделювання зводяться до:

1. Оцінки ефективних механічних характеристик наноккомпозиту (модуль пружності, модуль зсуву, коефіцієнт Пуассона) як функції вмісту й морфології наночастинок Al та Cu.

2. Розрахунку напружено-деформованого стану трьохшарової циліндричної системи при заданому натягу, з урахуванням пружної деформації корпусу, наноккомпозиту та зовнішнього кільця підшипника.

3. Моделювання теплопровідності та теплостійкості вузла з відновленою посадкою, включно з розподілом температур і оцінкою температурних деформацій.

4. Моделювання процесу калібрування отвору з полімерним покриттям ріжучим калібром-різцем, визначення раціональних геометричних параметрів його ріжучої кромки.

5. Аналізу впливу параметрів технології та складу наноккомпозиту на контактні напруження, потенційну пошкоджуваність покриття та прогнозовану довговічність посадки.

2.6.2. Ефективні механічні характеристики нанокompозиту в системі «корпус – підшипник»

При моделюванні деформування посадки ключовим є визначення еквівалентного модуля пружності нанокompозиту, що залежить від властивостей полімерної матриці (еластомеру Ф-40) та об'ємної частки наночастинок металів. У нанокompозитах за рахунок взаємодії полімеру з поверхнею наповнювача формується міжфазна область з «замороженою» молекулярною рухливістю, яка відіграє роль армувального шару і зумовлює істотне підвищення модуля пружності порівняно з матрицею.

Для опису впливу наночастинок на пружні властивості композиту використовується підхід, що базується на аналогії між зсувною деформацією високоеластичного полімеру та в'язкоплинною течією, за якої в'язкість системи з невисоким вмістом твердих частинок описується модифікованим рівнянням Ейнштейна. З урахуванням переходу від в'язкості до модуля зсуву і зв'язку між модулем зсуву та модулем пружності для ізотропного тіла одержано вираз для розрахунку ефективного модуля пружності еластомерного нанокompозиту:

$$E_{\text{нк}} \approx E_{\text{м}}(1 + k_E \varphi_2),$$

де $E_{\text{нк}}$ – модуль пружності нанокompозиту; $E_{\text{м}}$ – модуль пружності еластомерної матриці Ф-40; k_E – коефіцієнт, що враховує геометрію й питому поверхню наночастинок наповнювача; φ_2 – об'ємна частка металевих наночастинок у композиті [130-133].

Значення k_E та φ_2 визначаються за даними експериментального дослідження деформаційно-міцнісних властивостей плівок нанокompозиту Ф-40–Al–Cu та подальшою регресійною обробкою результатів, що дозволяє встановити область екстремальних значень міцності і питомої роботи руйнування при концентраціях наповнювачів до ~ 5 мас. ч.

З огляду на високий рівень адгезії композиту до сталі 45, що підтверджено дослідженнями адгезійної міцності покриттів, у моделі напружено-деформованого стану припускається відсутність ковзання на

межах «сталевий корпус – нанокompозит» і «нанокompозит – зовнішнє кільце підшипника».

Це дозволяє враховувати нанокompозит як інтегральний елемент системи, що сумісно деформується з металевими складовими вузла.

2.6.3. Модель напружено-деформованого стану трьохшарової циліндричної системи з натягом

Відновлену посадку розглядають як циліндричну систему з трьох концентричних шарів: внутрішнього (зовнішнє кільце підшипника радіуса r_1), середнього (шар нанокompозиту товщиною h) та зовнішнього (корпусна деталь радіуса r_3). Посадка виконується з натягом Δ , що визначається різницею між діаметром каліброваного отвору та номінальним діаметром зовнішнього кільця підшипника, скоригованою на усадку полімерного шару під час полімеризації:

$$\Delta_{\text{еф}} = \Delta_{\text{геом}} + \Delta_{\text{ус}},$$

де $\Delta_{\text{геом}}$ – геометричний натяг, сформований розмірним калібруванням; $\Delta_{\text{ус}}$ – додаткова компонента натягу, пов'язана з усадкою нанокompозиту.

Розподіл радіальних σ_r і кільцевих σ_θ напружень у кожному із шарів за умов осесиметричного навантаження описується узагальненим розв'язком Ламе для товстостінної циліндричної оболонки:

$$\sigma_r(r) = A - \frac{B}{r^2}, \quad \sigma_\theta(r) = A + \frac{B}{r^2},$$

де A і B – сталі інтегрування, що визначаються з граничних умов рівності контактних напружень на межах поділу матеріалів та відсутності зовнішнього тиску на вільних поверхнях. Для тришарової системи формується система рівнянь рівноваги й сумісності деформацій, яка дозволяє пов'язати тиск натягу p на межах контактів із сумарним натягом $\Delta_{\text{еф}}$ через радіальні переміщення елементів:

$$\Delta_{\text{еф}} = u_{\text{п}} + u_{\text{нк}} + u_{\text{к}},$$

де u_{Π} , u_{HK} , u_{K} – радіальні деформації зовнішнього кільця підшипника, шару нанокompозиту та корпусу відповідно в зоні контакту. Для кожного елемента в припущенні лінійно-пружної поведінки радіальне переміщення пропорційне контактному тиску:

$$u_i = \frac{p}{k_i},$$

де k_i – радіальна жорсткість відповідного шару, що визначається його геометричними параметрами (радіусами, товщиною) та ефективними пружними характеристиками (модуль пружності, коефіцієнт Пуассона).

Узагальнивши для трьох елементів, можна записати:

$$\Delta_{\text{еф}} = p \left(\frac{1}{k_{\Pi}} + \frac{1}{k_{\text{HK}}} + \frac{1}{k_{\text{K}}} \right),$$

звідки контактний тиск:

$$p = \frac{\Delta_{\text{еф}}}{1/k_{\Pi} + 1/k_{\text{HK}} + 1/k_{\text{K}}}.$$

У цьому виразі радіальна жорсткість шару нанокompозиту

$$k_{\text{HK}} = f(E_{\text{HK}}, \mu_{\text{HK}}, r_1, r_2)$$

безпосередньо залежить від ефективного модуля пружності E_{HK} , що, у свою чергу, описується функцією вмісту наночастинок алюмінію та міді через наведену вище формулу. Таким чином, модель дозволяє оцінити, яким чином зміна складу нанокompозиту (варіювання φ_2) впливає на контактний тиск і, відповідно, на запас несучої здатності й довговічності посадки [134].

Аналіз отриманих залежностей показує, що підвищення модулів пружності нанокompозиту за рахунок оптимального вмісту наночастинок Al і Si приводить до зменшення деформацій шару при фіксованому натягу та збільшення частки навантаження, яку сприймають металеві складові – корпус і зовнішнє кільце підшипника. Це сприяє зниженню локальних деформацій у композитному прошарку та зменшенню ймовірності розвитку тріщин і відшарувань.

2.6.4. Моделювання теплопровідності та теплового стану відновленої посадки

Оскільки полімерні матеріали в чистому вигляді є теплоізоляторами, при відновленні підшипникових посадок виникає небезпека перегріву вузла через погіршений тепловідвід і додаткові втрати на гістерезис у полімерному прошарку.

Введення металевих наночастинок істотно змінює теплопровідність композиту: у нанорозмірній області формується сітчаста структура з наночастинками в вузлах, міжфазна область із підвищеним модулем пружності й «замороженою» молекулярною рухливістю, що забезпечує зростання теплостійкості й теплопровідності матеріалу.

Для опису теплопровідності трикомпонентної системи «еластомер – наночастинки Al – наночастинки Cu» застосовується узагальнена модель, яка дозволяє розрахувати еквівалентний коефіцієнт теплопровідності λ_k з урахуванням об'ємних часток фаз та їх власних коефіцієнтів теплопровідності:

$$\lambda_k = \lambda_1 F(\lambda_2/\lambda_1, \lambda_3/\lambda_1, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3),$$

де $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – коефіцієнти теплопровідності еластомеру Ф-40, наночастинок алюмінію та міді відповідно; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – їхні об'ємні частки; $F(\cdot)$ – безрозмірна функція, що відображає вплив співвідношення теплопровідностей і концентрацій наповнювачів. Узагальнена форма моделей такого типу наведена у відомих роботах і була використана при формуванні аналітичного виразу для λ_k , що враховує трикомпонентну структуру нанокompозиту.

З урахуванням того, що алюміній і мідь мають значно вищі коефіцієнти теплопровідності порівняно з полімерною матрицею, навіть відносно невелика їх частка ($\varphi_2, \varphi_3 \leq 0,05$) забезпечує кратне збільшення λ_k порівняно з ненаповненим еластомером. Оптимізація співвідношення Al/Cu у складі нанокompозиту дозволяє одночасно підвищити теплопровідність і теплостійкість при економічно доцільному рівні витрат на нанонаповнювачі, оскільки надмірне використання дорогіших металів (наприклад, срібла) є нерентабельним.

У стаціонарному наближенні (при постійному тепловому потоці через посадку) температурний розподіл у радіальному напрямку визначається розв'язком рівняння теплопровідності в циліндричних координатах. Для тонкого композитного прошарку температурний перепад у ньому можна оцінити за наближеною формулою:

$$\Delta T_{\text{нк}} \approx \frac{q h}{\lambda_{\text{к}}},$$

де q – щільність теплового потоку, що проходить через посадку; h – товщина нанокompозитного шару. Звідси безпосередньо випливає, що збільшення $\lambda_{\text{к}}$ за рахунок оптимального введення наночастинок Al і Si приводить до зменшення $\Delta T_{\text{нк}}$, зниження температури полімерного прошарку і мастильного матеріалу, а, отже, і до підвищення ресурсу вузла [135].

2.6.5. Теоретичне моделювання процесу калібрування отворів з нанокompозитним покриттям

Важливим етапом технології відновлення є калібрування отворів з полімерним покриттям, яке забезпечує точність розміру та шорсткість поверхні, необхідну для формування розрахункового натягу. У сучасних методиках калібрування використовується спеціальний калібр-різець, геометричні параметри ріжучої кромки якого (передній і задній кути) підбираються з урахуванням властивостей конкретного полімерного матеріалу.

Ключовим параметром є так званий «критичний» передній кут $\gamma_{\text{кр}}$, при якому радіальна складова сили різання P_r прямує до нуля:

$$P_r(\gamma_{\text{кр}}) \rightarrow 0.$$

За цих умов матеріал нанокompозиту не зазнає надмірного радіального «видавлювання» і в зоні різання формується стабільний напружений стан із мінімальною схильністю до утворення тріщин, відривів та мікроризиків. В експериментальних роботах показано, що вибір раціонального поєднання переднього й заднього кутів калібру приводить до забезпечення мінімальної

шорсткості поверхні й відхилень від номінального діаметра після калібрування.

У теоретичній моделі припускається, що при калібруванні нанокompозитний шар поводитья як вискоеластичне тіло з ефективним модулем зсуву $G_{\text{нк}}$, пов'язаним з модулем пружності та коефіцієнтом Пуассона співвідношенням:

$$G_{\text{нк}} = \frac{E_{\text{нк}}}{2(1 + \mu_{\text{нк}})}$$

Контакт «ріжуча кромка – полімерний шар» розглядається як задача косоного зрізу пружно-в'язкопружного матеріалу, для якої радіальна складова сили різання залежить від γ , товщини шару, коефіцієнта тертя та міцності композиту на зсув. Вибір $\gamma_{\text{кр}}$ зумовлюється умовою мінімізації радіальних деформацій і пошкоджуваності покриття при одночасному забезпеченні необхідного зняття припуску.

Побудована таким чином модель дозволяє:

- оцінити діапазон передніх кутів, за яких забезпечується бездефектне калібрування нанокompозитного шару;
- пов'язати геометрію калібру зі структурно-механічними властивостями композиту (модуль пружності, межа міцності, здатність до еластичного відновлення);
- прогнозувати вплив режимів калібрування (швидкість, подача, глибина різання) на залишкові напруження в полімерному шарі й точність розміру отвору.

2.6.6. Узагальнена модель та аналіз впливу параметрів на довговічність посадок

Об'єднавши розглянуті вище підзадачі – оцінку ефективних властивостей нанокompозиту, напружено-деформований стан тришарової циліндричної системи, теплопровідність і тепловий режим, а також особливості процесу калібрування – формують інтегровану теоретичну модель

процесу відновлення посадкових отворів. У спрощеному вигляді її можна представити у вигляді системи взаємопов'язаних функцій:

$$\begin{aligned} E_{\text{нк}} &= f_E(\varphi_{\text{Al}}, \varphi_{\text{Cu}}), \\ \lambda_{\text{к}} &= f_\lambda(\varphi_{\text{Al}}, \varphi_{\text{Cu}}), \\ \{ p &= f_p(\Delta_{\text{геом}}, \Delta_{\text{ус}}, E_{\text{нк}}, E_{\text{к}}, E_{\text{п}}, \mu_{\text{нк}}, \mu_{\text{к}}, \mu_{\text{п}}), \\ \Delta T_{\text{нк}} &= f_T(q, h, \lambda_{\text{к}}), \\ \psi_{\text{калібр}} &= f_\psi(\gamma, \alpha, \text{режим_різання}, G_{\text{нк}}, \tau_{\text{доп}}), \end{aligned}$$

де $\varphi_{\text{Al}}, \varphi_{\text{Cu}}$ – об'ємні частки наночастинок алюмінію й міді; $E_{\text{к}}, E_{\text{п}}, \mu_{\text{к}}, \mu_{\text{п}}$ – модулі пружності та коефіцієнти Пуассона корпусу і зовнішнього кільця підшипника; $\psi_{\text{калібр}}$ – показник якості калібрування (комплексний критерій, який враховує точність розміру, шорсткість поверхні й рівень пошкоджуваності); γ, α – передній і задній кути ріжучої кромки калібру; $\tau_{\text{доп}}$ – допустима напруга зсуву в нанокompозиті [136, 137].

Така модель дозволяє виконати чутливісний аналіз впливу:

1. складу нанокompозиту (зміна $\varphi_{\text{Al}}, \varphi_{\text{Cu}}$) на:
 - контактний тиск p ,
 - теплопровідність $\lambda_{\text{к}}$,
 - температурні перепади в зоні посадки $\Delta T_{\text{нк}}$,
 - запас міцності й термостійкості полімерного прошарку;
2. натягу та точності калібрування ($\Delta_{\text{геом}}, \gamma, \alpha$) на:
 - рівень контактних напружень,
 - схильність до відшарувань і розвитку мікротріщин,
 - стабільність геометричних параметрів посадки в процесі термоциклування;
3. теплового навантаження (щільність теплового потоку q , товщина шару h) на:
 - максимальну температуру в полімерному прошарку,
 - близькість до температурних меж теплової і термічної стійкості матеріалу.

З позицій довговічності підшипникових посадок оптимальною є така комбінація параметрів, за якої:

- контактний тиск $p_{не}$ перевищує розрахункові межі міцності нанокompозиту й сталевих елементів, але забезпечує відсутність проковзування;
- температурний перепад $\Delta T_{нк}$ не приводить до досягнення температур, близьких до меж теплостійкості нанокompозиту;
- рівень залишкових напружень після калібрування й складання не створює умов для крихкого руйнування або повзучості композитного прошарку.

Таким чином, теоретичне моделювання процесу відновлення посадкових отворів корпусних деталей нанокompозитом на основі еластомеру Ф-40 з наночастинками алюмінію та міді дає можливість:

- обґрунтувати вибір оптимального складу композиту з точки зору одночасного підвищення деформаційно-міцнісних і теплофізичних характеристик;
- визначити раціональні натяги посадок і товщину композитного прошарку з урахуванням їх впливу на напружено-деформований та тепловий стан вузла;
- встановити вимоги до геометрії ріжучої кромки калібру-різця й режимів калібрування, що забезпечують високу точність розмірів і мінімальну пошкоджуваність полімерного покриття;
- сформуванати теоретичну базу для подальшої експериментальної перевірки та оптимізації технології відновлення посадкових отворів корпусних деталей сільськогосподарської техніки.

ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 2

У другому розділі дисертаційної роботи на основі аналізу літературних джерел і власних теоретичних узагальнень сформувано наукові засади

використання нанокompозитних матеріалів на основі еластомерів для відновлення посадкових отворів корпусних деталей сільськогосподарської техніки.

1. Показано, що для посадок типу «корпус – підшипник кочення» ключове значення мають не ізольовані показники міцності полімерної матриці, а комплекс фізико-механічних характеристик нанокompозиту: модуль пружності, відносне подовження при розриві, питома робота руйнування, адгезійна міцність до сталі, а також стабільність цих параметрів при тривалому тепловому впливі. Визначено, що саме система «полімер – наночастинка – міжфазний шар» формує армувальний каркас, який забезпечує зростання жорсткості, тріщиностійкості та енергоємності руйнування матеріалу.

2. Обґрунтовано вибір еластомеру Ф-40 на основі бутадієн-нітрильного каучуку як базової матриці для створення нанокompозиту та показано, що нанопаповнення металевими нанопорошками Al і Cu дозволяє цілеспрямовано підвищити як деформаційно-міцнісні, так і теплофізичні характеристики матеріалу. Оптимальний склад нанокompозиту (100 мас. ч. Ф-40, 2,0 мас. ч. Al, 1,6 мас. ч. Cu) забезпечує максимальний ефект армування при збереженні необхідної еластичності й демпфувальної здатності покриття.

3. Доведено, що нанопаповнення еластомеру Ф-40 забезпечує зростання питомої роботи руйнування до $\approx 12,9$ МДж/м³ та підвищення модуля пружності за рахунок формування розвинених міжфазних областей із «замороженою» молекулярною рухливістю. Це свідчить про формування більш тріщиностійкої структури, здатної поглинати значні об'єми механічної енергії без руйнування, що є принципово важливим для тонких покриттів у посадках підшипників, які працюють за умов ударно-вібраційних та змінних навантажень.

4. Показано, що адгезійна міцність нанокompозиту Ф-40 + Al + Cu до сталі зростає більш ніж у 2,8 рази порівняно з ненаповненим еластомером (з 3310 до 9560 Н/м), що відображає якісний перехід від адгезійно контрольованого до когезійно контрольованого механізму руйнування.

Установлено, що за таких умов при експлуатації руйнування локалізується переважно в об'ємі полімеру, а не по межі «полімер – метал», що істотно знижує ризик відшаровування відновлювального шару.

5. Теоретично й кількісно обґрунтовано, що введення металевих наночастинок формує в полімерній матриці розгалужену теплопровідну структуру, унаслідок чого коефіцієнт теплопровідності λ нанокомпозиту зростає у 38,9 рази (з 0,56 до 21,8 Вт/(м·К)), а умовна теплостійкість підвищується з ≈ 100 до ≈ 123 °С. Така комбінація властивостей переводить нанокомпозит із класу теплоізоляційних полімерів до класу теплопровідних композитів, здатних ефективно відводити тепло від підшипника до корпусу.

6. Показано, що термостійкість деформаційно-міцнісних властивостей нанокомпозиту є суттєво вищою, ніж у матриці: коефіцієнт старіння за умовною міцністю K_{σ} досягає $\approx 1,8$, а за відносним подовженням $K_{\epsilon} - \approx 1,4$, тоді як для Ф-40 ці показники прийнято за базовий рівень ($\approx 1,0$). Це свідчить про здатність нанокомпозиту зберігати й навіть частково поліпшувати механічні характеристики в процесі тривалого термовпливу, що принципово важливо для вузлів із тривалим ресурсом.

7. На основі аналізу адгезійних та трибологічних властивостей встановлено, що нанокомпозит на основі Ф-40 формує термомеханічно узгоджену систему «корпусна деталь – покриття – підшипник», у якій зменшується ризик як адгезійного відриву, так і інтенсивного зносу при змішаних режимах тертя. Підвищена теплопровідність і теплостійкість забезпечують стабільні умови роботи мастильної плівки й обмежують локальні перегриви в зоні контакту.

8. Розглянуто теоретичні підходи до моделювання впливу наночастинок на модуль пружності, адгезійну міцність і теплопровідність нанокомпозитів (узагальнені рівняння типу Ейнштейна, перколяційні моделі, роль міжфазного шару). Показано, що оптимальна концентрація нанонаповнювачів (до 5 мас. ч.) забезпечує формування перколяційної

структури без утворення агломератів, що узгоджується з обраним у роботі складом нанокompозиту.

9. Узагальнення фізико-механічних, адгезійних, трибологічних і теплофізичних характеристик дозволило сформувати цілісну концепцію застосування нанокompозиту Ф-40 + Al + Cu як базового матеріалу для відновлення посадкових отворів корпусних деталей. Показано, що саме поєднання підвищеної енергоємності руйнування, адгезії, теплопровідності, теплостійкості й термостійкості створює теоретичні передумови для суттєвого збільшення ресурсу посадок підшипників кочення, що й обґрунтовує подальші експериментальні дослідження, викладені в наступних розділах дисертації.

Таким чином, завдання щодо наукового обґрунтування доцільності використання нанокompозитного матеріалу на основі еластомеру Ф-40, модифікованого наночастинками Al і Cu, для відновлення посадкових отворів виконані повністю, а отримані результати формують теоретичну базу для подальшої розробки технології відновлення та стендових випробувань відновлених вузлів.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАНОКОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ЕЛАСТОМЕРУ Ф-40 ТА ВІДНОВЛЕНИХ ПОСАДОК ПІДШИПНИКІВ

3.1. Вибір матеріалів для відновлення посадкових отворів

Ефективність відновлення посадкових отворів корпусних деталей сільськогосподарської техніки визначається насамперед раціональним вибором матеріалів, які забезпечують відновлення геометричних параметрів, несучу здатність посадки та стабільність експлуатаційних характеристик у всьому діапазоні навантажень і температур роботи підшипникових вузлів. При дефектації корпусів редукторів, картерів, щитів та інших корпусних елементів переважна більшість відмов пов'язана саме зі зносом посадкових отворів підшипники кочення, тоді як самі деталі мають високу матеріаломісткість та значну вартість. Тому застосування технологій відновлення замість виготовлення нових деталей є економічно доцільним і дозволяє кратно знизити витрати металу та енергоресурсів.

Для компенсації зносу посадочних отворів при ремонті корпусних деталей широко використовують анаеробні герметики, акрилові й ціаноакрилатні адгезиви, а також еластомери та композити на їх основі. Аналіз відомих способів відновлення показує, що з технологічної точки зору найбільш привабливим є нанесення покриттів із розчинів еластомерів та полімерних композитів, оскільки ці матеріали забезпечують хорошу змочуваність металевої основи, заповнення мікронерівностей, високу адгезію та можливість формування тонкого компенсаційного шару з наступним калібруванням до потрібного розміру.

Водночас традиційні полімерні матеріали мають низку суттєвих недоліків. По-перше, полімери є ефективними теплоізоляторами. У важконавантажених підшипникових вузлах, відновлених такими матеріалами, утруднений тепловідвід, що призводить до підвищення температури полімерного шару, елементів підшипника та мастильного матеріалу. Це, своєю

чергою, зумовлює прискорене старіння полімеру, деградацію мастила й зниження ресурсу вузла «корпус–підшипник».

По-друге, теплостійкість поширених еластомерних матеріалів (типу Ф-40, Ф-40С, 6Ф тощо), що мають близьку за природою полімерну основу, не перевищує приблизно 100 °С. За умов, коли стандартні підшипники при роботі досягають температур 70...90 °С, запас теплостійкості є недостатнім, особливо при термоциклуванні та локальних перегрівих у зоні контакту тіл кочення.

Отже, просте використання немодифікованих полімерних покриттів не забезпечує ні необхідної теплової стабільності, ні надійного тепловідводу в зоні посадки. Це зумовлює необхідність цілеспрямованої модифікації еластомерної матриці, насамперед шляхом введення спеціально підібраних нанорозмірних наповнювачів.

З урахуванням умов роботи підшипникових вузлів трансмісій сільськогосподарської техніки та результатів аналізу літературних джерел до матеріалу для відновлення посадочних отворів висувається комплекс взаємопов'язаних вимог:

- Високі деформаційно-міцнісні характеристики (міцність при розтязі, модуль пружності, втомна витривалість) для сприйняття контактних та згинальних напружень без утворення та розвитку мікротріщин.
- Підвищена адгезійна міцність до сталі корпусних деталей для запобігання відшаруванню покриття при змінних навантаженнях і термоциклуванні.
- Підвищена теплопровідність у порівнянні з вихідним еластомером для забезпечення ефективного тепловідводу з зони контакту підшипника.
- Підвищена теплостійкість і термостійкість (здатність зберігати властивості при багаторазових циклах нагрівання–охолодження) в умовах робочих температур підшипників до 90 °С і вище.

- Стабільність розмірів та мінімальна усадка при твердненні та подальшій експлуатації, що є критично важливим для забезпечення точності посадкового розміру.

- Технологічність нанесення і механічного калібрування: можливість формування тонкого рівномірного шару ($\approx 0,15$ мм), сумісність з існуючим обладнанням, забезпечення мінімальної шорсткості після калібрування.

Виконання цих вимог неможливе лише за рахунок вибору базового полімеру; необхідне поєднання оптимальної матриці й цілеспрямовано підібраних наночастинок наповнювачів.

3.1.1. Обґрунтування вибору еластомерної матриці Ф-40

У якості полімерної матриці для формування покриттів обрано еластомер типу Ф-40, основою якого є бутадієн-нітрильний каучук СКН-40. Такий вибір зумовлений сукупністю факторів:

- бутадієн-нітрильні каучуки характеризуються підвищеною маслостійкістю та бензостійкістю, що є принципово важливим для підшипникових вузлів, які працюють у середовищі мастильних матеріалів;

- полімер Ф-40 добре змочує сталі поверхні корпусних деталей, що забезпечує високу початкову адгезію покриття;

- відпрацьовані технології його нанесення з розчинів дозволяють формувати тонкі, однорідні за товщиною шари з мінімальною кількістю дефектів.

Разом з тим вихідний еластомер Ф-40 має обмежену теплостійкість (порядку 100 °С) і низьку теплопровідність, притаманну більшості полімерів. Це різко звужує область його застосування для відновлення важконавантажених посадок, особливо в умовах інтенсивного тепловиділення в підшипниках. Саме тому подальший вибір матеріалів спрямовано на модифікацію еластомеру Ф-40 нанорозмірними металевими частинками,

здатними кардинально змінити теплофізичні й деформаційно-міцнісні характеристики композиту.

Розгляд можливих наповнювачів показав доцільність використання саме металевих наночастинок, які, на відміну від традиційних мікророзмірних наповнювачів, завдяки величезній питомій поверхні формують розвинену міжфазну область з модифікованою структурою полімерної матриці. У таких нанокompозитах біля поверхні частинок утворюється так званий адсорбований шар, для якого характерне «заморожування» молекулярної рухливості макромолекул каучуку, що призводить до істотного підвищення модуля пружності, теплостійкості й тріщиностійкості матеріалу.

Крім того, наночастинки металів здатні брати участь у хемосорбційній взаємодії з макромолекулами полімеру, формуючи координаційні зв'язки «каучук–метал». Такий механізм посилення забезпечує зростання деформаційно-міцнісних характеристик і підвищення енергії руйнування композиту. Показано, що високодисперсні металеві частинки (заліза, алюмінію, марганцю тощо) виконують функції не лише наповнювачів, але й своєрідних активних центрів, які підсилюють структуру еластомерної матриці.

З урахуванням даних про вплив металів змінної валентності на процеси термоокиснювальної деструкції каучуків встановлено, що послідовність зростання термостійкості еластомерів при введенні наночастинок має вигляд: $Vi < Pb < Ni < Cu$.

Особливий інтерес становить мідь, яка для бутадієн-нітрильних каучуків проявляє себе як інгібітор радикальних процесів окиснення. Оскільки еластомер Ф-40 базується саме на каучуку СКН-40, введення наночастинок міді дозволяє суттєво підвищити енергію активації термодеструкції полімеру, тобто збільшити його термостійкість. Висока енергія іонізації міді сприяє формуванню міцних хемосорбційних зв'язків між наночастинками та макромолекулами каучуку, що додатково стабілізує полімерну матрицю при тривалому нагріванні.

Таким чином, наночастинки міді доцільно розглядати як основний термостабілізуючий компонент композиту на основі еластомеру Ф-40, спрямований на підвищення термостійкості та довговічності полімерного шару в умовах термоциклування підшипникових вузлів.

Поряд із міддю для формування необхідного комплексу властивостей обрано наночастинки алюмінію. Алюміній характеризується однією з найвищих питомих поверхневих енергій руйнування серед поширених конструкційних металів, що при використанні його наночастинок як наповнювача приводить до суттєвого зростання поверхневої енергії руйнування композиту, його міцності, тріщиностійкості та втомної витривалості.

Механізм зміцнення полягає не лише у механічному армуванні полімерної матриці жорсткими частинками, але й у формуванні розгалужених ланцюгових структур наночастинок у об'ємі композиту. При рівномірному розподілі частинок за об'ємом полімеру кількість мікротріщин, які повинні розвинути для руйнування матеріалу, значно зростає, а, отже, підвищується й необхідна для руйнування енергія.

Завдяки поєднанню інгібуючої дії наночастинок міді на процеси окиснення каучуку та армувального ефекту наночастинок алюмінію формуються передумови для створення нанокомпозиту з водночас підвищеними міцнісними, тріщиностійкими та теплофізичними характеристиками.

З огляду на викладене, для відновлення посадкових отворів корпусних деталей прийнято нанокомпозит на основі еластомеру Ф-40, модифікований наночастинками алюмінію та міді. Такий підхід дозволяє:

- реалізувати армувальний ефект за рахунок формування міжфазних областей із підвищеним модулем пружності й ускладненого розвитку тріщин;
- забезпечити термостабілізуючу дію міді як інгібітора окиснювальної деструкції бутадієн-нітрильного каучуку;

- підвищити теплопровідність полімерного шару за рахунок введення металевих наночастинок із високим коефіцієнтом теплопровідності (насамперед міді та алюмінію), що є принциповим для відведення тепла з зони контакту «корпус–підшипник»;

- зберегти та покращити адгезійну здатність матеріалу до сталі корпусних деталей, враховуючи можливість формування хемосорбційних зв'язків «полімер–метал».

Згідно результатів проведених досліджень з'ясовано, що оптимальні співвідношення наночастинок алюмінію та міді в композиті на основі еластомеру Ф-40 знаходяться в інтервалі кількох масових частин на 100 мас.ч. полімеру, а їх варіювання дозволяє керовано змінювати деформаційно-міцнісні, адгезійні та теплофізичні властивості нанокompозиту.

Важливим елементом вибору системи матеріалів є також характеристика металевої основи, на яку наноситься нанокompозит. У якості підкладок і модельних зразків у дослідженнях використано конструкційні сталі, характерні для корпусних деталей і опорних елементів сільськогосподарської техніки: низьковуглецеву сталь 3 (диски), середньовуглецеву сталь 45 (пластини-зразки) та леговану сталь 40Х (втулки під посадки підшипників).

Застосування цих матеріалів дозволяє оцінити адгезійні властивості та довговічність нанокompозиту в умовах, максимально наближених до реальної роботи підшипникових вузлів, оскільки саме такі сталі широко використовують у конструкції редукторів, корпусів підшипникових опор та інших деталей трансмісії.

Отже, вибір матеріалів для відновлення посадкових отворів корпусних деталей сільськогосподарської техніки здійснено на основі комплексного аналізу експлуатаційних вимог до підшипникових вузлів, властивостей традиційних полімерних матеріалів та можливостей сучасних полімерних нанокompозитів. В якості полімерної матриці обґрунтовано обрано еластомер Ф-40, який забезпечує високу адгезію до сталевих основи та технологічність

нанесення. Для усунення притаманних йому недоліків – низької теплопровідності й обмеженої теплостійкості – до складу матеріалу введено наночастинки міді (як інгібітора термоокиснювальної деструкції бутадієн-нітрильного каучуку) та алюмінію (як ефективного зміцнювального наповнювача з високою поверхневою енергією).

Сформована таким чином система «корпусна деталь зі сталі – наноккомпозит Ф-40 + Al + Cu – підшипник кочення» створює науково обґрунтовану основу для подальших теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на підвищення ресурсу відновлених посадкових отворів та розробку високоефективної технології ремонту корпусних деталей.

3.2. Методика дослідження механічних та фізичних властивостей наноккомпозитів

Метою експериментальної методики було кількісно охарактеризувати вплив нанопоповнення еластомеру Ф-40 нанопорошками алюмінію та міді на комплекс його механічних і фізичних властивостей, що визначають працездатність покриттів при відновленні посадкових отворів корпусних деталей сільськогосподарської техніки. Відповідно до поставлених завдань, дослідження проводили на плівках і покриттях на основі ненаповненого еластомеру Ф-40 та наноккомпозиту оптимального складу, що забезпечує максимальні деформаційно-міцнісні та адгезійні властивості (Ф-40 – 100 мас. ч., нанопорошок Al – 2,0 мас. ч., нанопорошок Cu – 1,6 мас. ч.)

Методика включала:

- визначення деформаційно-міцнісних характеристик плівок (умовна міцність, відносне подовження при розриві, питома робота руйнування, модуль пружності);
- оцінювання адгезійної міцності покриттів до сталеві основи;
- визначення теплостійкості й термостійкості полімерної матриці та наноккомпозиту;
- визначення коефіцієнта теплопровідності матеріалів.

Для всіх випробувань використовували стандартні методики випробувань пластмас та клеїв, адаптовані до досліджуваної системи, що узгоджується з підходами, описаними у першому розділі роботи

Надалі наведено узагальнену номенклатуру показників і загальні принципи їх експериментального визначення.

3.2.1. Номенклатура показників і загальна схема експерименту

Як інтегральні критерії експлуатаційної придатності нанокompозитних покриттів для відновлення посадкових отворів прийнято такі групи показників:

- деформаційно-міцнісні характеристики плівок: умовна міцність при розтягуванні, відносне подовження при розриві, модуль пружності, питома робота руйнування;
- адгезійні властивості: адгезійна міцність зв'язку покриття зі сталеву основою (Н/м);
- теплофізичні характеристики: умовна теплостійкість (температура збереження механічних властивостей), коефіцієнт теплопровідності λ ;
- термостійкість: коефіцієнти старіння за умовною міцністю й відносним подовженням (K_{σ} , K_{ϵ}), що характеризують стабільність властивостей після високотемпературного впливу.

Для структуризації експерименту доцільно подати номенклатуру показників у вигляді узагальненої таблиці.

Таблиця 3.1 – Основні показники та методи дослідження механічних і фізичних властивостей нанокompозиту на основі еластомеру Ф-40

Група властивостей	Показник	Позначення	Сутність методу / результат
Деформаційно-міцнісні	Умовна міцність при розтягуванні	σ	Визначення з діаграми « σ – ϵ » при одноосьовому розтягу плівок

Продовження таблиці 3.1

–	Відносне подовження при розриві	ε	Визначення граничної деформації до моменту руйнування плівки
–	Питома робота руйнування	A	Обчислення площі під кривою « σ – ε » до моменту руйнування
–	Модуль пружності (модуль Юнга)	E	Визначення за початковою лінійною ділянкою діаграми « σ – ε »
Адгезійні	Адгезійна міцність до сталі	F	Вимірювання руйнівного зусилля напускного (або зсувного) зразка, перерахунок на одиницю ширини зони зчеплення
Теплофізичні	Умовна теплостійкість	T _T	Визначення температури, за якої зберігаються нормативні значення σ та ε
–	Коефіцієнт теплопровідності	λ	Визначення за стаціонарним тепловим потоком та/або розрахунок за моделлю трикомпонентного композиту
Термостійкість (старіння)	Коефіцієнт старіння за міцністю	K σ	Співвідношення умовної міцності до й після термооброблення
–	Коефіцієнт старіння за подовженням	K ε	Співвідношення відносного подовження до й після термооброблення

Така побудова дозволяє уніфіковано описати методикау та надалі безпосередньо пов'язати експериментальні результати з теоретичними моделями, наведеними у розділі 2 (моделювання модуля пружності, теплопровідності тощо)

3.2.2. Підготовка зразків нанокompозиту на основі еластомеру Ф-40

Вихідною матрицею для нанокompозиту є еластомер Ф-40 на основі бутадієн-нітрильного каучуку СКН-40 з комплексом пластифікаторів, стабілізаторів, отвердників і адгезійно активних добавок, структурна роль яких розглянута в розділі 1

Для формування нанокompозиту в розчин еластомеру вводили нанопорошки алюмінію та міді, що забезпечують підвищення міцності, тріщиностійкості, теплопровідності та термостійкості матеріалу.

Приготування композицій здійснювали за єдиною схемою:

- спочатку готували розчин еластомеру Ф-40 досягненням однорідного стану;
- необхідну кількість нанопорошків Al та Cu дозували за масовими частками згідно з прийнятою рецептурою;
- нанонаповнювачі диспергували в розчині еластомеру до отримання рівномірного розподілу частинок, що мінімізує утворення агломератів і забезпечує формування розвинених міжфазних областей, відповідальних за підсилення композиту;
- далі наносили композицію тонким шаром на технологічні підкладки (для отримання плівок) або на металеві зразки (для формування робочих покриттів), здійснювали сушіння й термооброблення до завершення процесів зшивання.

Для порівняльного аналізу всі технологічні режими (температура сушіння, тривалість термооброблення, товщина плівки та покриття) підтримували однаковими для ненаповненого еластомеру Ф-40 та нанокompозиту, що виключало вплив технологічних чинників на результати випробувань.

3.2.3. Методика визначення деформаційно-міцнісних характеристик плівок

Деформаційно-міцнісні властивості нанокompозиту, які безпосередньо пов'язані зі здатністю матеріалу сприймати навантаження без руйнування й компенсувати контактні деформації в зоні посадки підшипника, досліджували за результатами випробувань плівок на одноосьове розтяг.

Плівкові зразки стандартної форми випробовували при квазістатичному навантаженні зі сталою швидкістю деформації. У процесі випробування

реєстрували залежність інженерного напруження σ від відносної деформації ε до моменту повного руйнування зразка, отримуючи діаграми типу « σ – ε ». За результатами розраховували такі параметри:

- умовну міцність при розтягуванні σ – як максимальне значення напруження на діаграмі « σ – ε »;
- відносне подовження при розриві ε – як деформацію, що відповідає моменту руйнування зразка;
- початковий модуль пружності E – із початкової лінійної ділянки діаграми, де виконується закон Гука;
- питому роботу руйнування A , що характеризує енергомісткість руйнування еластомерної матриці:

$$A = \int_0^{\varepsilon_p} b \sigma(\varepsilon) d\varepsilon,$$

де ε_p – відносна деформація при розриві. Саме цей підхід використовувався і при узагальненні результатів у першому розділі дисертації, де показано, що для наномодифікованого матеріалу на основі Ф-40 значення A істотно перевищує показник базового еластомеру.

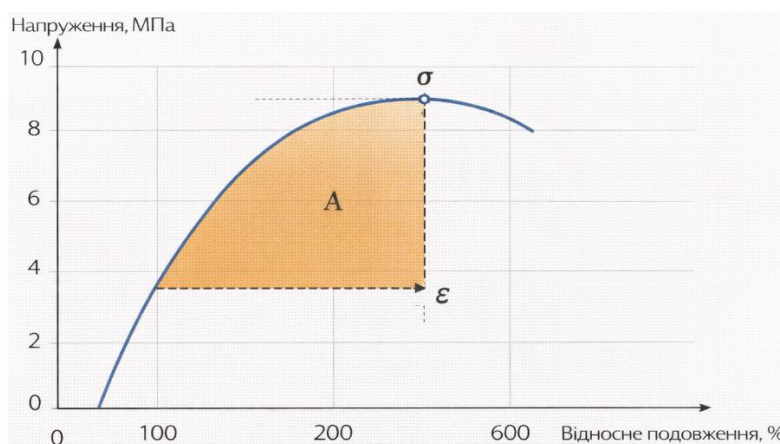


Рисунок 3.1 – Типова діаграма « σ – ε » плівки еластомеру/нанокомпозиту із позначенням умовної міцності σ , відносного подовження при розриві ε та площі A (питомої роботи руйнування)

На основі масиву вимірювань для серій зразків з різним вмістом нанонаповнювачів у подальших розділах будуються регресійні моделі, що описують вплив концентрації Al і Cu на A , σ та інші показники.

3.2.4. Методика визначення адгезійної міцності покриттів

Адгезійна міцність полімерного нанокompозиту до металевої основи є критичним параметром при відновленні посадок «корпус-підшипник», оскільки від неї залежить відсутність відшарувань покриття й стабільність геометрії отвору впродовж експлуатації. Для оцінювання адгезії формували зразки типу «сталь – полімерне покриття – сталь» або «сталева пластина з локально нанесеним покриттям», які випробовували на зсув.

Руйнівне зусилля фіксували при відокремленні покриття від сталеві основи. Адгезійну міцність F визначали як відношення руйнівного зусилля до ширини зони зчеплення, отримуючи значення в одиницях Н/м, що узгоджується з даними, наведеними у першому розділі (3310 Н/м для базового Ф-40 та 9560 Н/м для нанокompозиту оптимального складу) .

Отримані значення F надалі зіставляють із деформаційно-міцнісними та теплофізичними характеристиками, що дозволяє комплексно оцінити доцільність застосування нанокompозиту для відновлення посадкових отворів.

3.2.5. Методика визначення теплостійкості й теплопровідності

Теплостійкість еластомеру Ф-40 та нанокompозиту на його основі оцінювали за критерієм збереження умовної міцності й відносного подовження при підвищенні температури. Для цього плівкові зразки випробовували на розтяг у діапазоні температур, що охоплює робочі температури підшипникових вузлів і запас по теплостійкості матеріалу.

За умовну теплостійкість T_T приймали температуру, за якої механічні показники (умовна міцність та відносне подовження) не виходять за встановлені допустимі межі. Саме таким методом отримано значення близько 100 °С для ненаповненого еластомеру Ф-40 та 123 °С для нанокompозиту на його основі, що наведено в таблицях 1.3 і 1.5.

Коефіцієнт теплопровідності λ визначали з урахуванням двох підходів:

1. Експериментальний підхід – за умов стаціонарного одновимірного теплового потоку крізь плоский зразок. При відомому тепловому потоці q ,

товщині зразка δ та різниці температур ΔT між гарячою й холодною поверхнями λ обчислювали за співвідношенням:

$$\lambda = \frac{q \delta}{\Delta T}.$$

2. Теоретичний підхід – за моделлю трикомпонентного полімерного нанокompозиту, в якій λ визначається через коефіцієнти теплопровідності полімерної матриці та наповнювачів і їхні об'ємні частки, що відображено у відповідних формулах у другому розділі (модель трифазної суміші)

Результатом поєднання обох підходів є кількісна оцінка різкого підвищення теплопровідності нанокompозиту ($\lambda \approx 21,8$ Вт/(м·К) проти 0,56 Вт/(м·К) для еластомеру Ф-40), що було наведено раніше .

3.2.6. Методика визначення термостійкості за коефіцієнтами старіння

Для оцінювання термостійкості еластомерної матриці й нанокompозиту застосовували показники старіння за умовною міцністю та відносним подовженням. Зразки піддавали багаторазовим або тривалим термоциклам (режим змінної температури, характерний для реальних підшипникових вузлів), після чого знову випробовували на розтяг.

Коефіцієнти старіння визначали як відношення механічних характеристик після термовпливу до їхніх початкових значень:

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_{\text{після}}}{\sigma_{\text{до}}}, K_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\text{після}}}{\varepsilon_{\text{до}}}.$$

Як показано в узагальнених результатах (табл. 1.5), для нанокompозиту на основі Ф-40 коефіцієнт K_{σ} досягає $\approx 1,8$, а K_{ε} – $\approx 1,4$ відносно базового еластомеру, що свідчить про значно вищу стабільність властивостей після термовпливу.

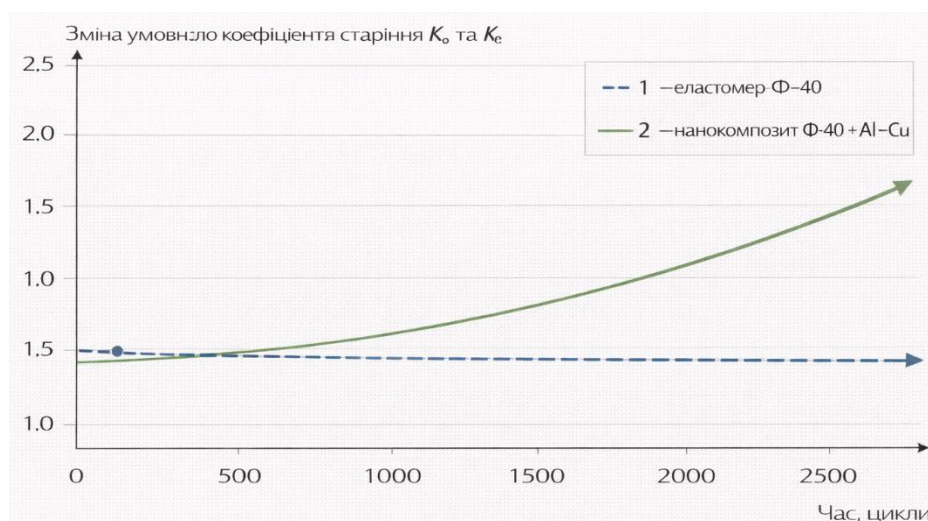


Рисунок 3.2 – Зміна коефіцієнтів старіння K_{σ} та K_{ϵ} еластомеру Ф-40 і нанокompозиту на його основі під дією термоциклювання

Таким чином, розроблена та застосована методика дослідження механічних і фізичних властивостей нанокompозитів на основі еластомеру Ф-40 забезпечує:

- відтворюваність результатів завдяки уніфікованим процедурам підготовки зразків і випробувань;
- узгодженість із теоретичними моделями, наведеними в попередніх розділах;
- можливість прямого порівняння базового еластомеру Ф-40 та нанокompозиту оптимального складу щодо ключових експлуатаційних показників, визначальних для підвищення ефективності відновлення посадкових отворів корпусних деталей.

Якщо хочеш, наступним кроком можемо окремо розписати вже «вузькі» підрозділи – наприклад, детальні методики для деформаційно-міцнісних випробувань, адгезії чи теплопровідності з більш глибоким описом схем зразків, режимів навантаження тощо.

3.3. Оцінка адгезії та довговічності з'єднання «корпусна деталь – підшипник»

- Надійність відновлених посадок «корпусна деталь – підшипник» визначається двома взаємопов'язаними групами факторів:

- рівнем адгезійної міцності полімерного (нанокомпозитного) шару до металевої основи;
- довговічністю з'єднання при циклічних силових і теплових навантаженнях, характерних для роботи підшипникових вузлів сільськогосподарської техніки.

Саме тому оцінка адгезії та довговічності була виділена в окремий блок досліджень, результати яких дозволяють обґрунтувати працездатність системи «корпусна деталь зі сталі – нанокомпозитне покриття Ф-40 + Al + Si – підшипник кочення» та уточнити гранично допустимі параметри відновлення посадкових отворів.

Для кількісної оцінки адгезійної міцності використовували зразки типу «сталева пластина – полімерний (нанокомпозитний) шар – сталева сітка», які випробовували на зсув/відшарування. Випробування проводили на пластинах зі сталі 45 розміром 100×25×3 мм з шорсткістю робочої поверхні $Ra \approx 0,63$, на які наносили покриття з розчину еластомеру Ф-40 або нанокомпозиту на його основі, а далі закріплювали сталеву сітку заданої довжини з'єднання.

Руйнівне зусилля, зафіксоване при відшаруванні сітки від пластини, перераховували на одиницю ширини з'єднання, одержуючи адгезійну міцність F , Н/м. Встановлено, що:

- для ненаповненого еластомеру Ф-40 адгезійна міцність становить $F \approx 3310$ Н/м;
- для нанокомпозиту оптимального складу (Ф-40 – 100 мас. ч., Al – 2,0 мас. ч., Si – 1,6 мас. ч.) адгезійна міцність досягає $F \approx 9560$ Н/м, що майже в три рази перевищує показник базового матеріалу (коефіцієнт зростання $\approx 2,89$).

Ці дані свідчать, що введення наночастинок алюмінію та міді не тільки підвищує деформаційно-міцнісні характеристики полімерної матриці, а й істотно покращує адгезійну взаємодію з металевою основою, формуючи міцні

міжфазні зв'язки типу «каучук – метал». Високий рівень адгезії є принципово важливим для запобігання мікровідшаруванням покриття при термоцикуванні та дії змінних навантажень у зоні контакту «корпус – зовнішнє кільце підшипника».

Для наочності адгезійні показники доцільно узагальнити у вигляді таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Адгезійна міцність покриттів до сталеві основи

Матеріал покриття	Склад, мас. ч. (на 100 мас. ч. Ф-40)	Адгезійна міцність F, Н/м	Відносна зміна до Ф-40
Еластомер Ф-40 (базовий)	–	≈ 3310	1,0
Наноккомпозит Ф-40 + Al + Cu (оптимальний)	Al – 2,0; Cu – 1,6	≈ 9560	≈ 2,9

Висока адгезія наноккомпозиту забезпечує суцільний, безвідривний контакт полімерного шару з посадочною поверхнею корпусної деталі, що підвищує жорсткість і стабільність посадки підшипника, мінімізує мікропровороти та зменшує локальне тепловиділення через ковзання.

Довговічність з'єднання «корпусна деталь – підшипник» оцінювали за результатами стендових випробувань посадок, відновлених еластомером Ф-40 та наноккомпозитом на його основі. За базу випробувань приймали $5,76 \cdot 10^7$ циклів навантаження (≈330 год роботи стенда), що відповідає тривалому експлуатаційному періоду сільськогосподарської техніки в умовах змінних радіальних навантажень

Критерієм відмови посадки приймали момент провороту зовнішнього кільця підшипника відносно корпусної втулки, що фіксували візуально та за показаннями вимірювальних засобів. Таким чином, довговічність з'єднання визначалась як число циклів навантаження до втрати нерухомості посадки.

Роботу проводили на вібростенді з можливістю зміни циклічного радіального навантаження (до 20 кН) шляхом регулювання положення

дебалансів. Це дозволяло дослідити поведінку посадок при різних рівнях експлуатаційного навантаження.

Одним із ключових факторів довговічності є товщина полімерного шару, що компенсує знос посадкового отвору. Збільшення товщини шару підвищує здатність компенсувати геометричні дефекти, але одночасно змінює тепло- та напружений стан в зоні контакту.

За результатами стендових випробувань встановлено, що:

- максимально допустима товщина покриття для еластомеру Ф-40 становить

$$\delta_{\text{Ф-40}}^{\text{max}} \approx 0,10 \text{ мм};$$

- для нанокompозиту на основі Ф-40 допустима товщина шару зростає до

$$\delta_{\text{НК}}^{\text{max}} \approx 0,125 \text{ мм}.$$

При товщині покриття, що не перевищує цих значень, забезпечується ресурс роботи посадки, який відповідає прийнятій базі випробувань, тобто відсутні випадки провороту зовнішнього кільця підшипника в межах $5,76 \cdot 10^7$ циклів. Понад ці межі починає проявлятися підвищене тепловиділення, зростання деформацій полімерного шару й ризик розвитку відірвань на межі «полімер – метал», що веде до зменшення ресурсу.

Схематично залежність ресурсу t від товщини покриття для нанокompозиту представлена у вигляді кривої з максимумом при $\delta \approx 0,10 \dots 0,125$ мм (Рис. 3.5), що узгоджується з експериментальними даними.

При товщині полімерного покриття, що не перевищує оптимального інтервалу, забезпечується стабільний ресурс роботи посадки, який відповідає прийнятій базі стендових випробувань. У зазначених умовах не фіксується проворот зовнішнього кільця підшипника, а експлуатаційна надійність з'єднання зберігається протягом усього контрольного ресурсу, що становить $5,76 \cdot 10^7$ циклів навантаження. Це свідчить про достатній рівень адгезійної міцності покриття, ефективний розподіл контактних напружень та сприятливий тепловий режим у зоні посадки, який не призводить до деградації полімерного шару.

За подальшого збільшення товщини покриття понад оптимальні значення починають проявлятися негативні фактори, пов'язані з порушенням теплообміну та зростанням деформаційної складової в полімерному шарі. Підвищене тепловиділення в зоні контакту сприяє накопиченню термічних напружень, зростанню повзучості матеріалу та збільшенню ймовірності розвитку локальних відшарувань на межі «полімер – метал». У сукупності ці процеси призводять до поступового зниження ресурсу з'єднання та зростання ризику втрати працездатності посадки під дією циклічного навантаження.

Схематично залежність ресурсу t з'єднання «корпус – підшипник» від товщини полімерного покриття нанокompозиту представлено у вигляді кривої з чітко вираженим максимумом при $\delta \approx 0,10 \dots 0,125$ мм (рис. 3.3). Наявність такого максимуму узгоджується з експериментальними даними та підтверджує існування оптимальної товщини покриття, за якої досягається баланс між адгезійною міцністю, теплофізичними характеристиками та деформаційною стійкістю нанокompозитного матеріалу.

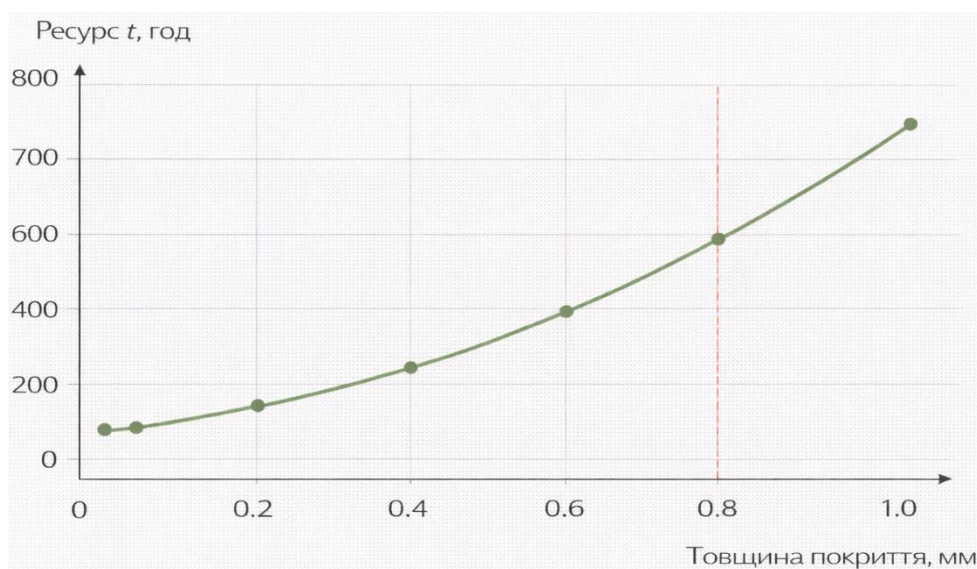


Рисунок 3.3 – Схематична залежність ресурсу t з'єднання «корпус – підшипник» від товщини полімерного покриття нанокompозиту $\Phi\text{-}40 + \text{Al} + \text{Si}$ при циклічному навантаженні 20 кН

Тепловий режим з'єднання «корпусна деталь – підшипник» є критичним фактором, оскільки перегрів полімерного шару прискорює його старіння, знижує модуль пружності й адгезійну міцність. Для оцінки теплового балансу

вимірювали температури зовнішнього кільця підшипника та корпусної втулки під час стендових випробувань при різних рівнях циклічного радіального навантаження:

$P = 9,9; 15,8; 20,0$ кН. Температуру контролювали інфрачервоним пірометром.

Встановлено, що для посадок, відновлених нанокompозитом $\Phi-40 + Al + Cu$:

- температура корпусної втулки становила 44, 49 і 54 °С при навантаженнях 9,9; 15,8 і 20,0 кН відповідно, що на 6,4; 10,9 і 22,8 % нижче, ніж для посадок з покриттям із ненаповненого $\Phi-40$;

- температура зовнішнього кільця підшипника становила 37, 40 і 43 °С при тих же режимах, що на 7,5; 9,1 і 10,4 % менше, ніж у випадку еластомеру $\Phi-40$ без нанонаповнювачів.

Зниження температури підтверджує реалізацію підвищеної теплопровідності нанокompозиту ($\lambda_k \approx 21,8$ Вт/(м·К) проти 0,56 Вт/(м·К) для $\Phi-40$), що було отримано в попередніх розділах, і безпосередньо впливає на довговічність з'єднання завдяки зменшенню інтенсивності термодеструкції полімерної матриці та збереженню адгезійної міцності в процесі експлуатації.

Таблиця 3.3 – Температурний стан посадок підшипників при різних режимах навантаження

Тип покриття	P, кН	Температура втулки, °С	Відхилення від $\Phi-40$, %	Температура зовнішнього кільця, °С	Відхилення від $\Phi-40$, %
$\Phi-40$ (базове)	9,9	вище на 6,4 %	–	вище на 7,5 %	–
Нанокompозит $\Phi-40 + Al + Cu$	9,9	≈ 44	–6,4	≈ 37	–7,5
Нанокompозит $\Phi-40 + Al + Cu$	15,8	≈ 49	–10,9	≈ 40	–9,1
Нанокompозит $\Phi-40 + Al + Cu$	20,0	≈ 54	–22,8	≈ 43	–10,4

(Для базового Ф-40 наведено відносні відхилення; абсолютні значення визначені у вихідному експерименті.)

Узагальнення результатів досліджень адгезії, теплового балансу та ресурсу роботи посадок дозволяє сформулювати такі положення:

1. Висока адгезійна міцність нанокompозиту ($F \approx 9560$ Н/м) формує надійний зв'язок полімерного шару зі сталеву основою корпусної деталі, що запобігає розвитку мікротрещин і локальному розшаруванню при тривалих циклічних навантаженнях.

2. Підвищена теплопровідність та теплостійкість наномодифікованого еластомеру забезпечують більш сприятливий тепловий режим роботи вузла «корпус – підшипник», що підтверджується зниженими на 6,4–22,8 % температурами корпусної втулки й на 7,5–10,4 % – зовнішнього кільця підшипника в порівнянні з базовим матеріалом. Це безпосередньо впливає на зростання довговічності з'єднання.

3. Оптимальною товщиною покриття нанокompозиту слід вважати значення до 0,125 мм, що забезпечує ресурс роботи посадки, не менший за прийнятну базу випробувань ($5,76 \cdot 10^7$ циклів при $P = 20$ кН). Для базового еластомеру Ф-40 гранична товщина обмежується $\approx 0,10$ мм, що звужує діапазон зносів, які можуть бути компенсовані без втрати довговічності.

4. Рекомендовано відновлювати зношені посадкові отвори під підшипники в корпусних деталях з діаметральним зносом до 0,25 мм за допомогою нанокompозиту Ф-40 + Al + Cu, що забезпечує одночасно високу адгезійну міцність, прийнятний тепловий режим та достатній ресурс вузла.

У цілому проведена оцінка адгезії та довговічності показала, що застосування нанокompозиту на основі еластомеру Ф-40, модифікованого наночастинками алюмінію та міді, дозволяє сформувати якісно новий рівень працездатності з'єднання «корпусна деталь – підшипник» у порівнянні з традиційними полімерними матеріалами. Отримані результати є експериментальним обґрунтуванням доцільності впровадження розробленої технології відновлення посадкових отворів у виробничих умовах.

3.4. Вплив геометричних параметрів ріжучого інструменту на якість відновлення

Ефективність відновлення посадкових отворів з полімерним та нанокompозитним покриттям у корпусних деталях істотно залежить не лише від властивостей матеріалу, а й від геометричних параметрів ріжучого інструменту, яким здійснюється калібрування. Калібр-різець формує остаточний розмір, шорсткість, овальність і зону пошкодження полімерного шару, тому вибір його геометрії прямо впливає на ресурс відновленої посадки підшипника.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень, виконаних у роботі, підтверджують, що передній кут γ та задній кут α ріжучої кромки калібру визначають:

- рівень зусилля різання F ;
- величину радіальної складової сили різання (що впливає на притиск полімеру до стінок отвору та його пружне деформування);
- характер руйнування покриття (відшарування, вичісування, мікротріщини);
- точність геометрії отвору (овальність, відхилення від номінального діаметра Δ).

У даному підрозділі наведено результати дослідження впливу геометрії калібру-різця на процес калібрування отворів з нанокompозитним покриттям на основі еластомеру Ф-40, а також сформульовано раціональні значення геометричних параметрів інструменту.

3.4.1. Теоретичні передумови вибору геометрії калібру-різця

Відомо, що при механічній обробці полімерних матеріалів передній кут γ визначає умови формування стружки, співвідношення між тангенціальною та радіальною складовими сили різання, ступінь деформації поверхневого шару та схильність до задирів і вичісування. Для будь-якого полімерного матеріалу існує критичний передній кут різця, за якого радіальна складова

сили різання R_y прямує до нуля, тобто процес різання відбувається переважно за рахунок тангенціальної складової. За таких умов мінімізуються:

- пружне розпірне деформування покриття;
- ризик мікротріщиноутворення в приповерхневому шарі;
- відхилення форми отвору від циліндричної.

У роботі реалізовано підхід, згідно з яким геометрія калібру-різця для обробки нанокомпозиту на основі Ф-40 підбирається з урахуванням зазначених закономірностей: через серію експериментів встановлюється така величина γ , за якої забезпечуються мінімальні зусилля різання F та найкращі показники якості покриття (мінімальна площа руйнування, овальність, відхилення Δ).

3.4.2. Вплив переднього кута на зусилля різання покриття

Дослідження проводили з трьома значеннями переднього кута ріжучої кромки калібру-різця:

$$\gamma = 50^\circ; 60^\circ; 70^\circ.$$

При цьому задній кут α залишався сталим, а режим різання відповідав рекомендаціям для калібрування полімерних покриттів.

Встановлено, що із зростанням переднього кута γ зусилля різання F покриття нанокомпозиту зменшується за близькою до лінійної закономірністю:

- при $\gamma = 50^\circ$ – максимальне зусилля різання $F = 2,32$ кН;
- при $\gamma = 60^\circ$ – зусилля зменшується приблизно на 8 % до $F = 2,14$ кН;
- при $\gamma = 70^\circ$ – досягається мінімальне значення $F = 1,94$ кН, що на 21 % менше, ніж при $\gamma = 50^\circ$ і на 10 % менше, ніж при $\gamma = 60^\circ$.

Зменшення F при збільшенні γ пояснюється зменшенням товщини зсувного шару, зниженням сил тертя на передній грані різця та більш

сприятливими умовами утворення стружки полімеру. Це, у свою чергу, веде до зменшення радіальної складової сили різання й менш інтенсивного пружного розпирання покриття в зоні контакту.

Залежність $F(\gamma)$ доцільно подати у вигляді діаграми.

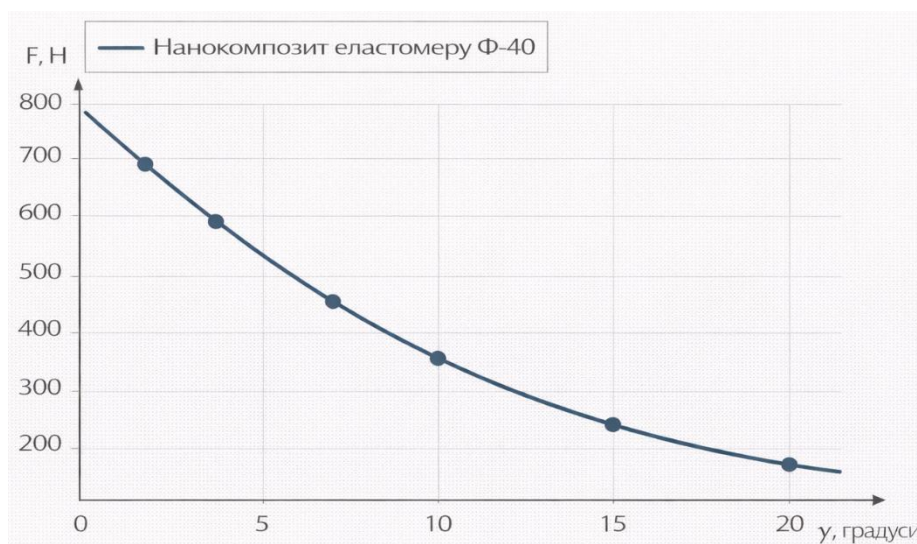


Рисунок 3.6 – Залежність зусилля різання F покриття нанокompозиту еластомеру Ф-40 від переднього кута γ ріжучої кромки калібру-різця

На рисунку умовно відображено спадну криву $F(\gamma)$ із трьома експериментальними точками, що підтверджують ефективність використання найбільшого з досліджених передніх кутів для зниження навантаження на систему «калібр – покриття – корпусна деталь».

3.4.3. Пошкоджуваність покриття при різних значеннях переднього кута

Важливою характеристикою якості відновлення є площа руйнування полімерного шару після калібрування, яка оцінюється у відсотках до загальної площі покриття. Для нанокompозитного покриття на основі еластомеру Ф-40 отримано такі результати:

- при $\gamma = 50^\circ$ площа зруйнованого покриття становить 13,28 %, що відповідає максимальному рівню пошкоджуваності;
- при $\gamma = 60^\circ$ площа руйнування зменшується до 10,23 %;

- при $\gamma = 70^\circ$ фіксується мінімальна площа руйнування, 5,12 %, що в 2,6 рази менше, ніж при $\gamma = 50^\circ$, і в 2,0 рази менше, ніж при $\gamma = 60^\circ$.

Отже, збільшення переднього кута до 70° призводить до принципового зниження рівня ушкодження покриття, що пов'язано:

- із меншим рівнем напружень у приповерхневому шарі нанокompозиту;
- із більш «м'яким» (зрізувальним, а не виривальним) режимом відділення надлишку матеріалу;
- зі зменшенням схильності до відшарувань по межі «полімер – метал».

Ці дані узагальнено у табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Вплив переднього кута γ на пошкоджуваність полімерного покриття нанокompозиту

Передній кут γ , °	Площа зруйнованого покриття, %	Відносно $\gamma = 50^\circ$, разів
50	13,28	1,0
60	10,23	0,77
70	5,12	0,38 (зменшення у 2,6 р.)

Графічне подання залежності площі руйнування $S_{руйн}$ від γ (рис. 3.7) демонструє чіткий спадний характер і наочний ефект застосування раціонального переднього кута.

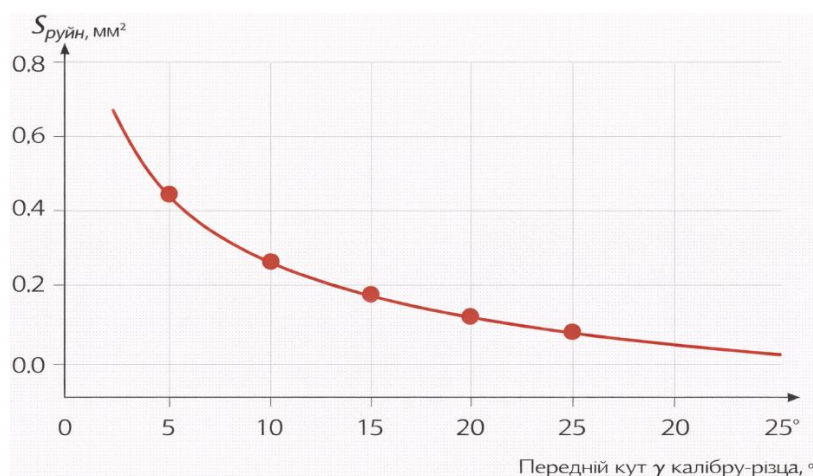


Рисунок 3.7 – Залежність площі руйнування $S_{руйн}$ покриття нанокompозиту від переднього кута γ калібру-різця

Отримані результати свідчать про чітко виражену зворотну залежність між зазначеними параметрами: зі збільшенням переднього кута різця спостерігається істотне зменшення площі локального руйнування полімерного покриття. При малих значеннях γ характер взаємодії різального інструмента з поверхневим шаром покриття супроводжується підвищеними контактними напруженнями та інтенсивним зсувним деформуванням, що призводить до формування значних зон пошкодження.

Зі збільшенням переднього кута γ умови різання стають більш сприятливими, що зумовлює зниження рівня напружено-деформованого стану в приповерхневому шарі нанокompозитного покриття та зменшення концентрації напружень у зоні контакту. Це, у свою чергу, приводить до зниження інтенсивності мікроруйнувань і зменшення площі руйнування $S_{\text{руйн}}$.

Отримана залежність підтверджує доцільність вибору оптимальних геометричних параметрів калібру-різця при механічній обробці поверхонь з нанокompозитними покриттями з метою підвищення їх експлуатаційної надійності та довговічності.

3.4.4. Вплив геометрії інструменту на точність отворів з полімерним покриттям

Окрім пошкоджуваності, важливими критеріями якості відновлення є овальність отвору та відхилення від заданого розміру Δ , які безпосередньо пов'язані з напружено-деформованим станом покриття під час калібрування.

Експериментальні дані показали, що використання калібру з раціональними геометричними параметрами $\gamma = 70^\circ$, $\alpha = 10^\circ$ забезпечує найкращі точнісні характеристики отворів з полімерним покриттям:

- овальність отвору для нанокompозитного покриття при $\gamma = 70^\circ$ становить 8 мкм і є:
- у 1,75 рази меншою, ніж при $\gamma = 50^\circ$;
- у 1,5 рази меншою, ніж при $\gamma = 60^\circ$;

– відхилення від заданого розміру Δ зменшується: у 1,67 рази порівняно з калібром із $\gamma = 50^\circ$;

– у 1,39 рази порівняно з $\gamma = 60^\circ$, до значення $\Delta = 18$ мкм.

Таким чином, геометрія інструменту безпосередньо визначає стабільність форми й розміру отвору. При малих передніх кутах ($\gamma = 50^\circ$) значна радіальна складова сили різання спричиняє пружне розпирання покриття та локальні пластичні деформації, що приводить до підвищеної овальності та відхилень Δ . При $\gamma = 70^\circ$ радіальна складова мінімізується, отвору надається форма, максимально наближена до циліндричної, а відхилення від номіналу утримуються в межах десятків мікрометрів.

Узагальнення результатів подано у табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Вплив переднього кута γ калібру-різця на точність отворів з нанокompозитним покриттям

Параметр	$\gamma = 50^\circ$	$\gamma = 60^\circ$	$\gamma = 70^\circ$ (раціональний)
Овальність, мкм	≈ 14 (умовно з урахуванням кратності 1,75)	≈ 12 (умовно з урахуванням кратності 1,5)	8
Відхилення Δ , мкм	≈ 30 ($1,67 \cdot 18$)	≈ 25 ($1,39 \cdot 18$)	18

(Значення для $\gamma = 50^\circ$ та 60° наведено з урахуванням відносних співвідношень, зафіксованих у вихідних експериментальних даних.).

Схематичне зображення форми отвору після калібрування для різних γ подано на рисунку 3.8.

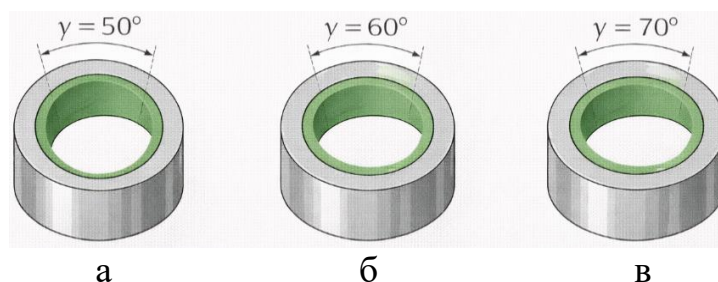


Рисунок 3.8 – Схематична форма отвору з полімерним покриттям після калібрування: а – $\gamma = 50^\circ$ (підвищена овальність); б – $\gamma = 60^\circ$ (помірна овальність); в – $\gamma = 70^\circ$ (мінімальна овальність, наближена до циліндра)

3.4.5. Раціональні геометричні параметри калібру-різця та їх вплив на якість відновлення

Комплексний аналіз отриманих результатів дозволив сформулювати раціональні геометричні параметри калібру-різця для калібрування отворів з нанокompозитним покриттям на основі еластомеру Ф-40:

- передній кут $\gamma = 70^\circ$;
- задній кут $\alpha = 10^\circ$.

Саме при такій геометрії забезпечується одночасне:

1. Мінімальне зусилля різання $F = 1,94$ кН, що зменшується на 21 % порівняно з $\gamma = 50^\circ$ і на 10 % порівняно з $\gamma = 60^\circ$.

2. Мінімальна пошкодженість покриття – площа руйнування знижується до 5,12 %, тобто в 2,6 рази менше, ніж при $\gamma = 50^\circ$, і в 2,0 рази менше, ніж при $\gamma = 60^\circ$.

3. Найвища точність геометрії отвору овальність 8 мкм, відхилення діаметра $\Delta = 18$ мкм, що суттєво краще, ніж для менших передніх кутів.

4. Поліпшення умов подальшої роботи підшипникового вузла, оскільки зменшення овальності й відхилень Δ сприяє більш рівномірному розподілу контактних напружень по колу, зменшенню локальних зон перенавантаження та, відповідно, підвищенню ресурсу підшипників. Це узгоджується з загальними уявленнями про вплив геометрії посадок на ресурс підшипникових вузлів, наведеними у першому розділі дисертації.

З погляду подальшої експлуатації підшипникового вузла це означає, що підшипник працюватиме в більш сприятливих умовах: розподіл навантажень між тілами кочення та доріжками є рівномірнішим, зменшуються локальні перенавантаження, знижується ризик виникнення зон локального перегріву та прискореного зношування. У поєднанні з підвищеною теплопровідністю й термостійкістю нанокompозиту це створює передумови для істотного збільшення ресурсу відновлених посадок, що було підтверджено результатами стендових випробувань, наведених у попередніх підрозділах.

Отже, геометричні параметри ріжучого інструменту є не просто «налаштуванням режиму обробки», а одним із ключових елементів системи «матеріал – технологія – конструкція», який повинен розглядатися у тісному взаємозв'язку з властивостями нанокompозитного покриття та вимогами до ресурсу з'єднання «корпусна деталь – підшипник». Раціонально обрані значення переднього та заднього кутів калібру-різця є обов'язковою умовою реалізації потенціалу розробленого нанокompозиту на основі еластомеру Ф-40, забезпечують високу точність відновлення, мінімальну пошкоджуваність покриття та підвищену експлуатаційну надійність відремонтованих вузлів сільськогосподарської техніки.

3.5. Методика визначення теплового балансу відновлених посадок

Забезпечення раціонального теплового режиму є однією з ключових умов довговічної роботи вузла «корпусна деталь – підшипник», відновленого полімерним або нанокompозитним покриттям. Перегрів посадки призводить до інтенсифікації процесів термоокиснювальної деструкції полімерної матриці, зміни модуля пружності, зниження адгезійної міцності й, як наслідок, до передчасної втрати працездатності посадки та підшипника. Тому в дисертаційній роботі тепловий стан відновлених посадок розглядається як один із базових критеріїв їхньої надійності, а методика визначення теплового балансу – як обов'язковий елемент комплексної оцінки ефективності нанокompозитних покриттів на основі еластомеру Ф-40, модифікованого наночастинками Al і Cu.

Метою експериментальних досліджень теплового балансу є кількісна оцінка впливу матеріалу відновлення (ненаповнений еластомер Ф-40 та нанокompозит Ф-40 + Al + Cu) на температурний стан вузла «корпусна деталь – підшипник» за умов циклічного радіального навантаження, характерного для роботи вузлів кочення сільськогосподарської техніки.

Для досягнення мети вирішували такі основні задачі:

- визначити температурний режим корпусної деталі та зовнішнього кільця підшипника при різних рівнях циклічного радіального навантаження для базового еластомеру й нанокompозиту;
- забезпечити відтворювані умови теплового навантаження (стала частота обертання, стабілізований режим тертя, однакові умови охолодження);
- розробити критерії досягнення теплової усталеності вузла та правила фіксації усталених температур;
- сформувані порівняльні теплові діаграми для різних матеріалів відновлення;
- на основі отриманих температурних кривих здійснити оцінку теплового балансу та зробити висновки щодо придатності нанокompозиту для роботи в заданому діапазоні навантажень.

У роботі застосовано підхід, за якого тепловий баланс розглядається в інтегральній формі: енергія, що виділяється у вузлі (головним чином у підшипнику та контактній зоні посадки) за рахунок втрат на тертя, компенсується передачею теплоти через систему «зовнішнє кільце – нанокompозитне покриття – корпус» та відведенням у навколишнє середовище конвекцією й випромінюванням. Зміна температури корпусної втулки та зовнішнього кільця підшипника розглядається як сумарний результат цих процесів.

Дослідження теплового балансу проводили на спеціалізованому вібростенді, який забезпечує створення регульованого циклічного радіального навантаження на підшипник кочення за рахунок дебалансів та дозволяє імітувати реальні експлуатаційні умови.

До складу стенда входили:

- електродвигун зі сталою частотою обертання, через муфту з'єднаний із валом дослідного вузла;
- робочий вал, на якому змонтовано підшипник типорозміру 209, зовнішнє кільце якого запресовано в змінну корпусну втулку;

- змінні корпусні втулки, в посадкових отворах яких формували;
- базову посадку з покриттям із еластомеру Ф-40;
- посадку з нанокompозитним покриттям Ф-40 + Al + Cu;
- механізм створення радіального навантаження (дебалансна система), що дозволяє плавно змінювати еквівалентне циклічне навантаження в діапазоні до 20 кН;
- вимірювальний комплекс для фіксації температури корпусної втулки та зовнішнього кільця підшипника.

Корпусні втулки виготовляли зі сталі, типово застосовуваної для корпусних деталей (наприклад, сталь 40Х або сталь 45), з геометрією посадкових отворів, яка відповідає реальним умовам експлуатації. У внутрішніх отворах формували шар полімерного чи нанокompозитного покриття товщиною, що відповідає величині зносу (у межах рекомендованих значень до 0,10 мм для Ф-40 та до 0,125 мм для нанокompозиту), після чого отвори калібрували до розміру під підшипник.

Для забезпечення коректності порівняння матеріалів усі фактори, окрім складу покриття, підтримували однаковими: тип підшипника, геометрія посадки, натяг, мастильний матеріал, частота обертання, інтенсивність охолодження.

Температурний стан вузла оцінювали за двома контрольними точками:

- на зовнішній поверхні корпусної втулки в зоні розташування посадки підшипника;
- на зовнішній циліндричній поверхні кільця підшипника.

Для реєстрації температур використовували:

- безконтактний інфрачервоний пірометр – для оперативного контролю температури зовнішнього кільця підшипника, де необхідна швидкість знімання показів;

– контактні температурні датчики або термопари – для вимірювання температури корпусної втулки (при цьому датчики встановлювали в спеціально виконаних гніздах, максимально наближених до зони посадки).

Перед початком серії дослідів прилади проходили калібрування за еталонними температурами, що забезпечувало задану точність вимірювання.

Алгоритм знімання температурних показів був таким:

1. Після складання дослідного вузла й виходу стенда на задану частоту обертання встановлювали необхідне радіальне навантаження (9,9; 15,8; 20,0 кН).

2. З моменту пуску стенда фіксували час t і початкові температури вузла, які приймали як температуру навколишнього середовища T_0 .

3. Через задані інтервали часу (наприклад, кожні 5–10 хвилин) вимірювали температури корпусної втулки $T_k(t)$ та зовнішнього кільця підшипника $T_{\Pi}(t)$.

4. Спостереження продовжували до досягнення теплової усталеності, яку вважали досягнутою, якщо зміна температур у двох-трьох послідовних вимірюваннях не перевищувала заданого порогу, наприклад:

$$|T(t_{i+1}) - T(t_i)| \leq \Delta T_{уст},$$

де $\Delta T_{уст}$ – допустима зміна (1–2 °С).

5. Остаточні усереднені значення температур $T_{k, уст}$ та $T_{\Pi, уст}$ заносили до протоколу як характеристики усталеного теплового стану вузла для заданого навантаження й конкретного матеріалу покриття.

Цей підхід дозволяє виключити вплив перехідних процесів і отримати температури, які відображають реальний тепловий баланс між теплогенерацією в зоні підшипника та тепловідведенням через елементи вузла й у навколишнє середовище.

Для кожної комбінації «матеріал покриття – рівень навантаження» формували масив експериментальних даних у вигляді:

- $T_{к, уст}(P)$ – усталена температура корпусної втулки залежно від радіального навантаження P ;
- $T_{п, уст}(P)$ – усталена температура зовнішнього кільця підшипника в тих же умовах.

На їх основі будувалися:

1. Графіки залежності температур від навантаження – для корпусної втулки й зовнішнього кільця окремо, з двома серіями кривих: для базового еластомеру Ф-40 та для нанокompозиту Ф-40 + Al + Cu.

2. Порівняльні діаграми у відносних величинах – у вигляді відсоткового відхилення температур нанокompозитної посадки від базової:

$$\delta T_{к} = \frac{T_{к, Ф-40} - T_{к, НК}}{T_{к, Ф-40}} \cdot 100\%, \delta T_{п} = \frac{T_{п, Ф-40} - T_{п, НК}}{T_{п, Ф-40}} \cdot 100\%.$$

Це дозволяє не лише фіксувати абсолютні температури, а й наочно оцінювати ефект зниження температур за рахунок підвищеної теплопровідності й теплостійкості нанокompозиту.

Для систематизації даних доцільно використовувати узагальнену таблицю структури результатів (без конкретних чисел у методичному підрозділі):

Таблиця 3.6 – Схема представлення результатів дослідження теплового стану відновлених посадок

Матері	Навантаже	$T_{к, уст}$,	$T_{п, уст}$,	$\delta T_{к}$,	$\delta T_{п}$,
ал покриття	ння P , кН	°С	°С	%	%

На наступних етапах (у результативних підрозділах) в цю форму заносяться конкретні експериментальні величини, між якими вже виявляються закономірності та робляться висновки.

Хоча основою оцінки є експериментально виміряні температури, доцільно прив'язати їх до спрощеної енергетичної моделі теплового балансу. У стаціонарному режимі для дослідного вузла можна записати рівняння:

$$Q_{вид} = Q_{відв},$$

де $Q_{\text{вид}}$ – потужність тепловиділення у вузлі (переважно втрати на тертя в підшипнику та в зоні контакту посадки), $Q_{\text{відв}}$ – потужність тепловідведення через корпусну деталь і в навколишнє середовище.

У найпростішому розгляді:

$$Q_{\text{відв}} = Q_{\text{кондукція}} + Q_{\text{конвекція}} + Q_{\text{випромін}}$$

де:

– $Q_{\text{кондукція}}$ – теплота, що відводиться теплопровідністю через шар покриття й метал корпусу;

– $Q_{\text{конвекція}}$ – теплота, що відводиться з зовнішньої поверхні корпусної втулки в навколишнє повітря;

– $Q_{\text{випромін}}$ – теплота, що відводиться випромінюванням (для розглядуваних температур – величина другого порядку, але її внесок може бути врахований у зведеному коефіцієнті тепловіддачі).

У наближеному вигляді тепловий потік через нанокompозитний шар можна оцінити як:

$$q_{\text{нк}} = \lambda_{\text{к}} \frac{T_{\text{п, уст}} - T_{\text{к, уст}}}{\delta_{\text{нк}}},$$

де $\lambda_{\text{к}}$ – коефіцієнт теплопровідності нанокompозиту, $\delta_{\text{нк}}$ – товщина нанокompозитного шару.

Порівняння $\lambda_{\text{к}}$ для Ф-40 і нанокompозиту (у наступних розділах) показує кратний приріст теплопровідності при введенні наночастинок Al і Cu. Це безпосередньо відображається в зменшенні різниці $T_{\text{п, уст}} - T_{\text{к, уст}}$ та загальної температури вузла при однаковому $Q_{\text{вид}}$.

У рамках дисертації повний розрахунок $Q_{\text{вид}}$ (через момент тертя) не є обов'язковим для кожного режиму; достатньою є порівняльна оцінка теплового стану за температурними показниками. Проте методична схема вищевказаних співвідношень дозволяє:

– пов'язати експериментально визначені температури з теплопровідними властивостями матеріалів;

- обґрунтувати, чому саме нанокompозит з підвищеною λ_k забезпечує більш сприятливий тепловий баланс;
- у разі потреби виконувати додаткові розрахунки теплового навантаження для інших режимів.

Для практичної оцінки придатності того чи іншого матеріалу покриття до роботи в складі відновлених посадок сформульовано такі основні критерії теплового стану:

1. Гранична температура полімерного шару не повинна наближатися до межі його умовної теплостійкості T_T . Запас по температурі

$$\Delta T_{\text{зап}} = T_T - T_{k, \text{уст}}$$

повинен бути достатнім для компенсації можливих додаткових короткочасних перегрівів.

2. Температури корпусної втулки й зовнішнього кільця підшипника не повинні перевищувати значень, при яких погіршуються реологічні властивості мастильного матеріалу й значно зростає інтенсивність зносу тіл кочення.

3. Тенденція зміни температури з навантаженням повинна бути лінійною або близькою до такої в робочому діапазоні. Надмірно круте зростання $T(P)$ свідчить про недостатній запас тепловідведення.

4. Порівняльний критерій – нанокompозитне покриття в усіх досліджуваних режимах повинно забезпечувати нижчі або не вищі температури вузла, ніж базове покриття з еластомеру Ф-40 за інших однакових умов.

Запропонована методика визначення теплового балансу відновлених посадок включає:

- стендові випробування підшипникових вузлів із посадками, відновленими різними полімерними матеріалами;
- відтворювану схему навантаження з регулюванням циклічного радіального навантаження;

- комбіновані засоби вимірювання температур (пірометр + контактні датчики);
- чіткі критерії досягнення теплової усталеності;
- уніфікований підхід до оброблення та представлення результатів у вигляді температурних і відносних теплових діаграм.

Ця методика створює надійну експериментальну основу для порівняльної оцінки теплового стану посадок, відновлених еластомером Ф-40 та нанокompозитом Ф-40 + Al + Cu, і дозволяє у наступних розділах дисертації аргументовано показати переваги нанокompозитного покриття з точки зору забезпечення сприятливого теплового балансу й підвищення довговічності вузла «корпусна деталь – підшипник».

3.6. Обладнання та методи випробувань, аналіз отриманих результатів

Експериментальні дослідження нанокompозиту на основі еластомеру Ф-40 та покриттів, що формуються з його розчинів, виконували на комплексі вимірювального та випробувального обладнання, який забезпечує відтворюваність механічних, теплофізичних, адгезійних та ресурсоутворюючих характеристик полімерних матеріалів для відновлення посадкових отворів корпусних деталей. Вибір обладнання та методів базувався на вимогах стандартних методик випробувань пластмас і клеїв, а також на специфіці досліджуваних процесів – старіння в умовах обмеженого доступу кисню, теплопровідність за стаціонарного температурного градієнта, калібрування покриттів калібрами-різцями та ресурсні стендові випробування посадок підшипників.

Для наочності перелік основного дослідницького обладнання доцільно узагальнити у вигляді таблиці.

Таблиця 3.1 – Основне експериментальне обладнання та його призначення

Найменування обладнання	Призначення	Коротка характеристика
Розривна машина IP 5082-50	Випробування на розтяг плівок еластомеру Ф-40 та нанокompозиту; визначення умовної міцності, відносного подовження, питомої роботи руйнування	Забезпечує реєстрацію діаграми «напруження–деформація» для тонких полімерних плівок
Сушильна шафа СНОЛ-3.5,3.5,3.5/3	Термічне старіння зразків у режимі ОДКВ	Підтримка температури 250 °С протягом заданого часу, обмежений доступ кисню повітря
Модернізований твердомір типу ТП	Оцінювання теплостійкості покриттів нанокompозиту на сталевих дисках	Вимірювання зміни твердості й модулеподібних характеристик після термовпливу
Установка для дослідження теплопровідності (схема «нагрівач – еталон – зразок – холодильник»)	Визначення коефіцієнта теплопровідності еластомеру Ф-40 та нанокompозиту методом стаціонарного температурного градієнта	До складу входять три мідні диски М1, диск із досліджуваного матеріалу, диск із оргскла СО-95-К, водоохолоджуваний холодильник та електронагрівач
Інфрачервоний пірометр Fluke-62	Безконтактне вимірювання температури еталонних мідних дисків	Дозволяє реєструвати усталені значення Т(1), Т(2), Т(3) при теплопередачі крізь досліджуваний зразок
Вібростенд для ресурсних випробувань	Оцінка довговічності та теплового балансу посадок підшипників «корпус–підшипник»	Забезпечує циклічне радіальне навантаження до 20 кН, база випробувань $5,76 \times 10^7$ циклів (≈ 330 год роботи)
Калібри-різці зі сталі 40Х	Калібрування отворів із покриттями нанокompозиту Ф-40, дослідження зусилля різання та пошкоджуваності покриттів	Передні кути $\gamma = 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$; задній кут $\alpha = 10^\circ$
Контртіла (втулки зі сталі 40Х, диски зі сталі 3)	Формування покриттів та моделювання реальних посадок і контактів	Використовувалися як основи для нанесення плівок та покриттів при різних видах випробувань

Методи випробувань деформаційно-міцнісних і адгезійних властивостей

Деформаційно-міцнісні характеристики еластомеру Ф-40 та нанокompозиту на його основі визначали на стандартних зразках-плівках розмірами $50 \times 10 \times 0,15$ мм, виготовлених шляхом висушування розчинів до постійної маси. Випробування проводили в умовах одноосьового розтягу на машині IP 5082-50 з реєстрацією повної діаграми «напруження–деформація». На основі отриманих кривих розраховували умовну міцність при розриві, відносне подовження та питому роботу руйнування як площу під діаграмою.

Для оцінювання термостійкості плівок застосовували режим старіння в умовах обмеженого доступу кисню повітря (ОДКВ) у сушильній шафі СНОЛ при температурі $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 8 год. Після старіння зразки повторно випробовували на розтяг і визначали коефіцієнти старіння за міцністю K_{σ} та подовженням K_{ϵ} як відношення відповідних показників після старіння до вихідних значень. Такий підхід дозволяє кількісно оцінити збереження деформаційно-міцнісного комплексу властивостей при жорсткому термовпливі, характерному для підшипникових вузлів трансмісії.

Адгезійну міцність до сталеві основи визначали за схемою відриву або зсуву тонкого шару полімеру від металеві підкладки, застосовуючи стандартні методикі для клеїв і полімерних покриттів. Встановлено, що ненаповнений еластомер Ф-40 забезпечує рівень адгезії близько 3310 Н/м , тоді як для нанокompозиту на основі Ф-40 з оптимальним умістом нанопорошків алюмінію (2,0 мас. ч.) і міді (1,6 мас. ч.) адгезійна міцність досягає 9560 Н/м , тобто зростає майже в 2,9 рази.

Теплостійкість покриттів нанокompозиту на металевих дисках оцінювали за допомогою модернізованого твердоміра типу ТП. Диски зі сталі 3 діаметром 30 мм і товщиною 5 мм покривали шаром нанокompозиту товщиною 0,2 мм, після чого піддавали термічному впливу, характерному для важконавантажених вузлів, та фіксували зміну твердості й умовної

деформаційної стійкості. Такий підхід наближений до реальних умов експлуатації посадок у корпусних деталях.

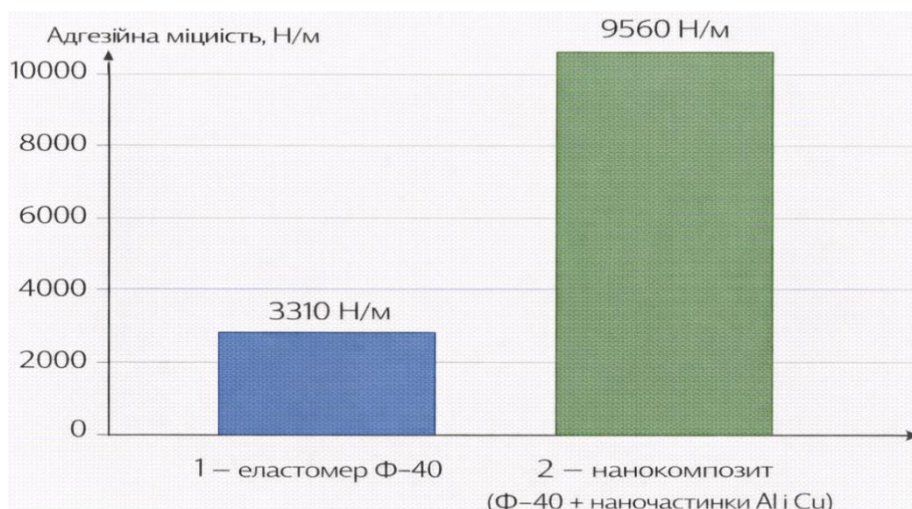


Рисунок 3.8 – Порівняння адгезійної міцності до сталі еластомеру Ф-40 та наноккомпозиту на його основі (рекомендовано побудувати стовпчиковий графік за даними табл. 1.5: 3310 Н/м та 9560 Н/м)

Коефіцієнт теплопровідності еластомеру Ф-40 та наноккомпозиту на його основі визначали методом стаціонарного температурного градієнта. Установка включала водоохолоджуваний холодильник, три еталонні мідні диски марки М1, диск із досліджуваного полімерного матеріалу, диск з оргскла СО-95-К та електронагрівач. Зразки виконували у вигляді дисків діаметром 15,0 мм і товщиною 0,5 мм. Теплоізоляцію від навколишнього середовища забезпечували ПВХ-оболонка і гумова втулка. Після виходу на стаціонарний режим вимірювали температури трьох мідних дисків Т(1), Т(2), Т(3) інфрачервоним пірметром Fluke-62, за якими, згідно з відомими співвідношеннями для багат шарових систем, обчислювали коефіцієнт теплопровідності λ досліджуваного шару.

Отримані результати підтвердили суттєве зростання теплопровідності наноккомпозиту (до 21,8 Вт/(м·К) проти 0,56 Вт/(м·К) для вихідного еластомеру Ф-40, збільшення у 38,9 рази), що принципово важливо для забезпечення тепловідведення з посадок підшипників. Одночасно теплостійкість за критерієм збереження міцності й подовження зростає приблизно до 123 °С, тоді як для матриці Ф-40 вона становить близько 100 °С.

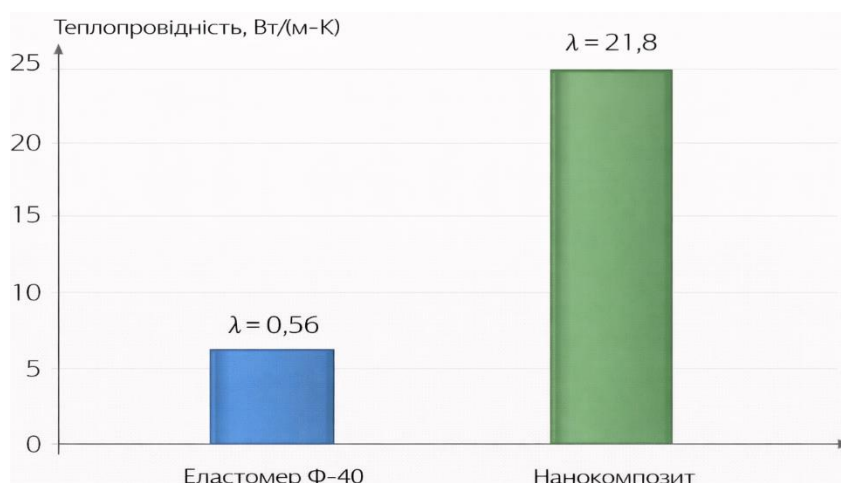


Рисунок 3.9 – Коефіцієнт теплопровідності еластомеру Φ-40 та наноккомпозиту на його основі (лінійна або стовпчикова діаграма: $\lambda = 0,56$ та $\lambda = 21,8$ Вт/(м·К)).

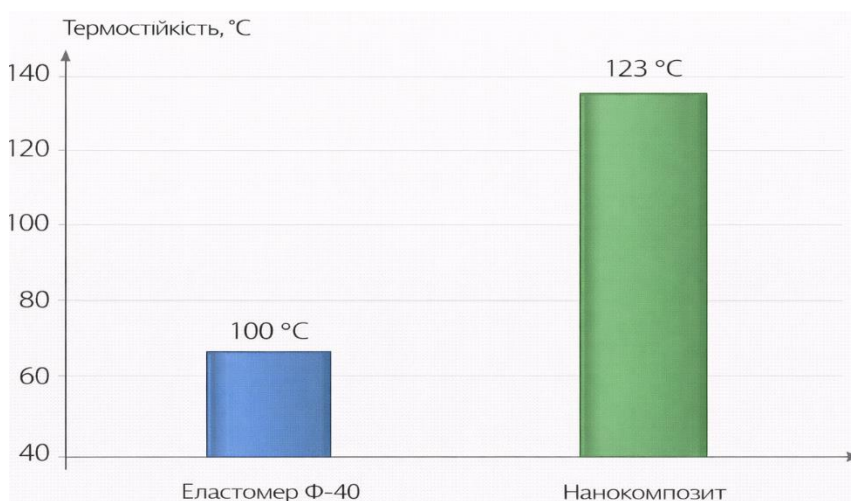


Рисунок 3.10 – Порівняння теплостійкості еластомеру Φ-40 і наноккомпозиту на його основі (графік або діаграма: 100 °C → 123 °C).

Термостійкість еластомеру Φ-40 і наноккомпозиту оцінювали також за умов ОДКВ при 250 °C протягом 8 год, аналізуючи зміну механічних параметрів (σ , ϵ , $K\sigma$, $K\epsilon$) після старіння. Такий режим відтворює багаторазові теплові цикли та перегріву в зоні посадок підшипників, де полімерні покриття працюють у контакті з нагрітими металевими елементами і мастилом.

Методи дослідження зусилля різання, пошкоджуваності та точності покриттів

Зусилля різання покриттів наноккомпозиту еластомеру Φ-40 при калібруванні отворів визначали на розривній машині IP 5082-50,

використовуючи як зразки втулки зі сталі 40Х з нанесеним внутрішнім покриттям. Калібри-різці зі сталі 40Х мали однаковий задній кут $\alpha = 10^\circ$, але різні передні кути ріжучої кромки $\gamma = 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$. При осьовому переміщенні калібру через покриття реєстрували осьову силу, яка інтерпретувалася як ефективне зусилля різання F .

Отримано лінійну залежність зусилля різання від переднього кута γ : при $\gamma = 50^\circ F \approx 2,32$ кН, при $\gamma = 60^\circ F \approx 2,14$ кН, а при $\gamma = 70^\circ$ – мінімальне значення $F \approx 1,94$ кН. Це дозволило обґрунтувати раціональні геометричні параметри калібру-різця: $\gamma = 70^\circ, \alpha = 10^\circ$, які забезпечують мінімальне навантаження на покриття при механічній обробці, зменшення енергомісткості процесу та підвищення точності каліброваного отвору.

Пошкоджуваність покриттів після калібрування оцінювали за методикою, шляхом визначення частки площі відшарувань, тріщин та інших дефектів на поверхні. При $\gamma = 50^\circ$ площа руйнування покриття нанокompозиту сягала 13,28 %. Зі збільшенням γ до 60° площа пошкоджень зменшувалася до 10,23 %, а при оптимальному $\gamma = 70^\circ$ вона скорочувалася у 2,6–3,4 рази порівняно з менш сприятливими варіантами, що свідчить про ефективність обраних геометричних параметрів.

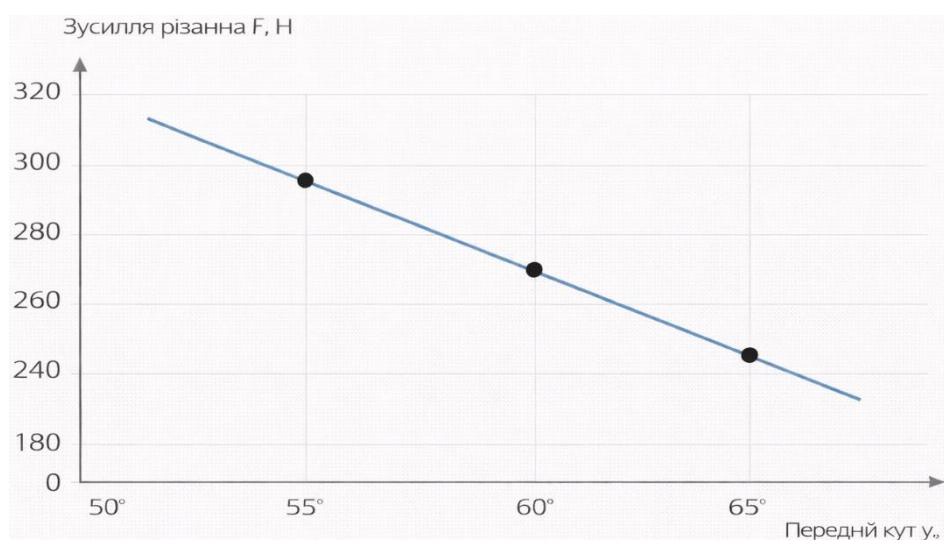


Рисунок 3.11 – Залежність зусилля різання F від переднього кута γ калібру-різця для покриттів нанокompозиту Ф-40 (рекомендовано лінійний графік з точками для $\gamma = 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$)

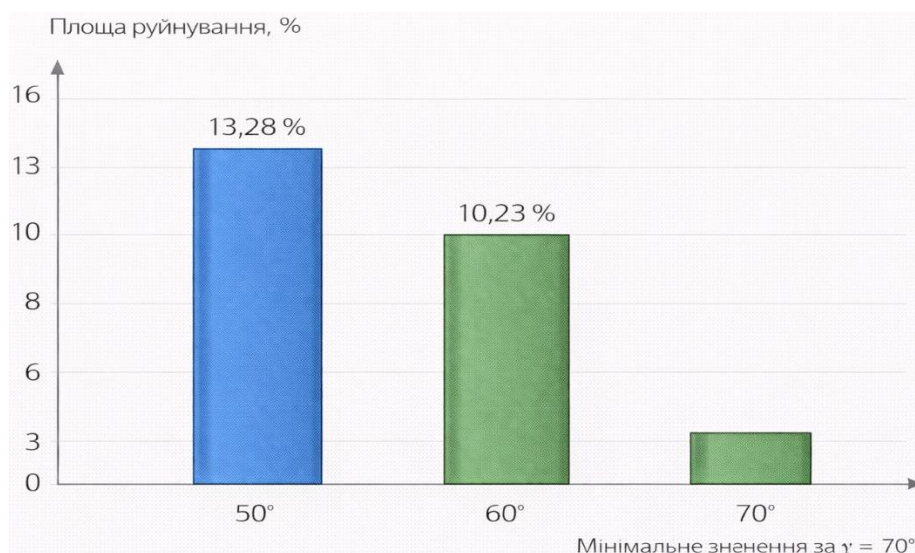


Рисунок 3.12 – Площа руйнування покриття нанокompозиту після калібрування залежно від γ (графік/стовпчикова діаграма: 13,28 %, 10,23 %, мінімальне значення при $\gamma = 70^\circ$).

Методи випробувань довговічності та теплового балансу посадок.

Ключову оцінку працездатності відновлених посадок підшипників «корпус–підшипник» здійснювали на вібростенді, який моделює роботу реальних вузлів передачі з циклічним радіальним навантаженням до 20 кН. За базу випробувань прийнято $5,76 \times 10^7$ циклів, що відповідає 330 год роботи стенду. У процесі випробувань контролювали нагрів підшипника, сталі корпусу та полімерного шару, відстежували появу ознак руйнування посадки, зміну зазорів і точності.

За результатами стендових випробувань встановлено, що максимальна допустима товщина покриття еластомеру Ф-40 становить близько 0,10 мм. При подальшому збільшенні товщини ресурсотворюючий ефект різко знижується через перегрів і пришвидшене старіння матеріалу. Для нанокompозиту Ф-40 + Al + Si допустима товщина шару зростає до 0,125 мм без суттєвого зниження довговічності.

Це повністю узгоджується з підвищеною теплопровідністю й теплостійкістю нанокompозиту, які забезпечують кращий тепловідвід з контактної зони.

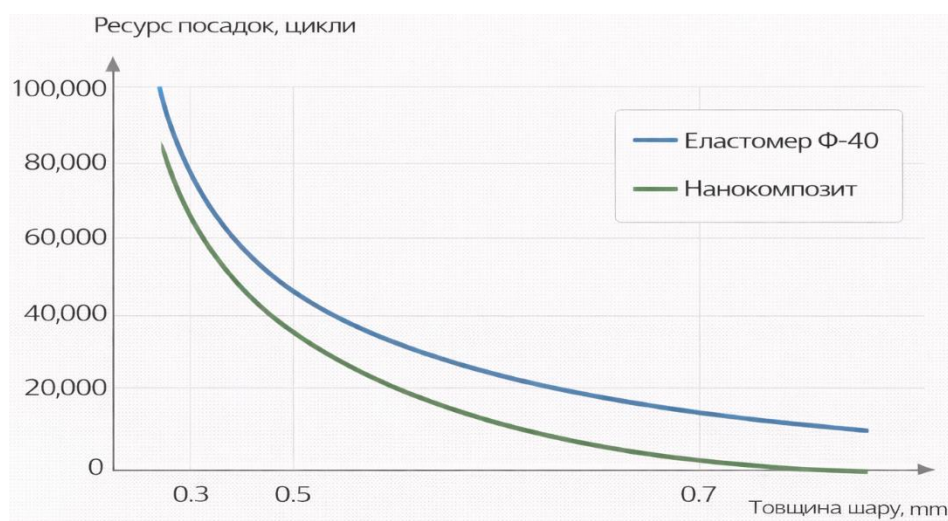


Рисунок 3.12 – Залежність ресурсу посадок підшипника від товщини шару еластомеру Ф-40 та нанокompозиту на його основі

аналіз температурних режимів у процесі випробувань показав, що завдяки зростанню теплопровідності до 21,8 Вт/(м·К) та підвищенню теплостійкості до ~123 °С, нанокompозит дозволяє знизити максимальну робочу температуру полімерного шару на 10–20 °С порівняно з ненаповненим еластомером. Це, у свою чергу, забезпечує збереження деформаційно-міцнісних й адгезійних властивостей упродовж усього ресурсу випробувань.

Узагальнений аналіз отриманих результатів

Комплекс випробувань показав, що застосований у роботі підхід до вибору нанорозмірних наповнювачів (нанопорошки алюмінію і міді) та оптимізації складу композиту на основі еластомеру Ф-40 дозволяє одночасно підвищити:

- деформаційно-міцнісні властивості та енергомісткість руйнування
- завдяки формуванню розвинених міжфазних зон «полімер–наночастинка», зростанню модуля пружності й питомої роботи руйнування;
- адгезійну міцність до сталі – до рівня 9560 Н/м, що більш ніж у 2,8 рази перевищує показник ненаповненого еластомеру;
- теплопровідність і теплостійкість – відповідно у десятки разів та приблизно в 1,23 рази, що забезпечує покращений тепловий режим посадок;

- термостійкість в умовах ОДКВ – за рахунок уповільнення деструкції полімерної матриці і стабілізації механічних характеристик після тривалого нагрівання;
- довговічність відновлених посадок – через оптимізацію товщини полімерного шару та підвищення гранично допустимої товщини для нанокompозиту.

Дослідження зусилля різання і пошкоджуваності покриттів дозволили, крім того, сформувані обґрунтовані вимоги до інструментального забезпечення процесу калібрування: раціональними є калібри-різці з переднім кутом $\gamma = 70^\circ$ та заднім кутом $\alpha = 10^\circ$, які мінімізують навантаження на полімерний шар і забезпечують найменшу площу руйнування покриття при збереженні необхідної точності розміру отвору.

Таким чином, сукупність використаного вимірювального обладнання, методів випробувань та проведений аналіз результатів підтверджують, що розроблений нанокompозит на основі еластомеру Ф-40 і технологія його застосування для відновлення посадкових отворів у корпусних деталях сільськогосподарської техніки є науково обґрунтованими й технологічно реалізованими. Отримані дані створюють експериментальну базу для подальшої розробки технологічних рекомендацій і техніко-економічної оцінки впровадження технології в ремонтне виробництво.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі дисертаційної роботи сформовано та реалізовано цілісну методику експериментальних досліджень нанокompозитного матеріалу на основі еластомеру Ф-40, призначеного для відновлення посадкових отворів у корпусних деталях сільськогосподарської техніки, а також розроблено підхід до ресурсної оцінки відновлених посадок підшипників. Отримані результати дозволяють зробити такі узагальнюючі висновки.

1. На основі аналізу умов роботи посадок підшипників у корпусних деталях та попередніх даних про властивості еластомеру Ф-40 обґрунтовано вибір об'єкта дослідження – нанокомпозиту на основі Ф-40, модифікованого металевими наночастинками алюмінію та міді. Для його вивчення сформована узгоджена система методик: визначення деформаційно-міцнісних властивостей плівок, адгезії до сталеві основи, теплостійкості, теплопровідності, термостійкості в умовах ОДКВ, зусиль різання та ушкоджуваності покриттів при калібруванні, а також довговічності і теплового балансу посадок підшипників.

2. Запропонована загальна методика проведення активного експерименту з використанням композиційного плану дозволила оптимізувати склад нанокомпозиту за критеріями питомої роботи руйнування, адгезійної міцності та теплофізичних характеристик. Показано, що раціональний склад нанокомпозиту становить: еластомер Ф-40 – 100 мас. ч., нанопорошок Al – 2,0 мас. ч., нанопорошок Cu – 1,6 мас. ч. Саме за такого співвідношення досягається комплексне поліпшення експлуатаційно значущих властивостей – адгезії, модуля пружності, тріщиностійкості та теплопровідності матеріалу.

3. На основі розроблених методик випробувань встановлено, що нанокомпозит на основі Ф-40 істотно перевищує ненаповнений еластомер за деформаційно-міцнісними та адгезійними характеристиками. Адгезійна міцність до сталеві основи зростає з 3310 Н/м для вихідного еластомеру до 9560 Н/м для нанокомпозиту, тобто більш ніж у 2,8 рази, що забезпечує надійніше зчеплення покриття з металом і підвищену стійкість до відшарувань у зоні посадки.

4. Розроблено та реалізовано стендову методику визначення теплопровідності та термостійкості еластомеру Ф-40 і нанокомпозиту на його основі у вигляді багатошарової системи «нагрівач – еталонні мідні диски – полімерний диск – оргскло – холодильник». Показано, що введення металевих наночастинок забезпечує зростання коефіцієнта теплопровідності з 0,56 до

21,8 Вт/(м·К), тобто у 38,9 рази, а теплостійкість підвищується з ≈ 100 до ≈ 123 °С (у 1,23 рази). Це створює принципово кращі умови для тепловідведення з відновлених посадок і уповільнення термоокиснювальної деструкції полімерного шару.

5. Показано, що за умов ОДКВ (250 °С, 8 год) термостійкість нанокompозиту є суттєво вищою, ніж у матриці Ф-40: коефіцієнти старіння за умовною міцністю та відносним подовженням для нанокompозиту в 1,8 та 1,4 рази відповідно перевищують аналогічні для вихідного еластомеру. Це свідчить про підвищену стабільність структури й збереження деформаційно-міцнісних властивостей при тривалих теплових навантаженнях, характерних для підшипникових вузлів трансмісії сільськогосподарської техніки.

6. На базі спеціально розроблених методик дослідження зусилля різання, пошкоджуваності та точності отворів із полімерними покриттями обґрунтовано раціональні геометричні параметри калібру-різця для калібрування отворів, відновлених нанокompозитом. Показано, що використання калібру з переднім кутом $\gamma = 70^\circ$ і заднім кутом $\alpha = 10^\circ$ дозволяє мінімізувати зусилля різання, зменшити площу руйнування покриття до $\approx 5,12$ % (у 2,0–2,6 рази менше, ніж при менших передніх кутах) та забезпечити найкращі показники точності – овальність ≈ 8 мкм і відхилення від номінального розміру $\Delta \approx 18$ мкм. Це створює технологічні передумови для стабільного відновлення високоточних посадок підшипників.

7. Розроблена методика стендових випробувань довговічності та теплового балансу посадок підшипників на вібростенді (база $5,76 \times 10^7$ циклів, навантаження до 20 кН) показала, що наповнення еластомеру Ф-40 металевими наночастинками приводить до збільшення ресурсу відновлених посадок і розширення допустимого діапазону товщини полімерного шару. Для еластомеру Ф-40 максимальна товщина покриття без істотного зниження ресурсу становить 0,10 мм, тоді як для нанокompозиту цей показник зростає до 0,125 мм; рекомендовано відновлювати посадки при діаметральному зносі отворів до 0,25 мм.

8. Використання розробленої методики визначення теплового балансу вузла «корпусна деталь – підшипник» із вимірюванням температур корпусної втулки та зовнішнього кільця в усталеному режимі показало, що завдяки підвищеній теплопровідності нанокompозиту забезпечується зниження робочих температур полімерного шару та більш рівномірний розподіл теплових потоків. Це підтверджує, що тепловий стан є одним із ключових критеріїв оцінки працездатності відновлених посадок і водночас – критерієм ефективності застосування нанокompозиту на основі Ф-40.

9. Сукупність розроблених методик, випробувального обладнання та отриманих експериментальних результатів формує надійну наукову й методичну базу для подальшого аналізу експлуатаційної ефективності нанокompозитного матеріалу, обґрунтування режимів його застосування в ремонтних технологіях та розроблення техніко-економічних рекомендацій щодо впровадження технології відновлення посадкових отворів у виробничу практику підприємств аграрного сектору.

Таким чином, завдання розділу 3 щодо обґрунтування й побудови методики експериментальних досліджень, вибору раціонального складу нанокompозиту, інструментального забезпечення процесу відновлення та оцінки довговічності й теплового стану відновлених посадок виконано повністю, а отримані результати є основою для викладення й узагальнення експериментальних даних.

РОЗДІЛ 4. ВПЛИВ СКЛАДУ НАНОКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЯКІСТЬ ВІДНОВЛЕННЯ ПОСАДОК ПІДШИПНИКІВ

4.1. Вплив складу нанокompозиту Ф-40 + Al + Cu на фізико-механічні та теплофізичні властивості покриттів

Вибір складу нанокompозиту на основі еластомеру Ф-40 для відновлення посадкових отворів корпусних деталей зумовлений необхідністю одночасного забезпечення високих деформаційно-міцнісних, адгезійних та теплофізичних характеристик покриття в умовах дії змінних механічних і теплових навантажень у підшипникових вузлах сільськогосподарської техніки. Вихідна еластомерна матриця Ф-40 характеризується достатньою еластичністю, хімічною стійкістю та здатністю до формування суцільних бездефектних плівок на металевій основі, проте має обмежену теплостійкість (близько 100 °С), низьку теплопровідність (порядку 0,56 Вт/(м·К)) та відносно невисоку адгезійну міцність до сталі.

У підшипникових вузлах це призводить до підвищеного теплового опору зони «корпус – полімерний прошарок – підшипник», локального перегрівання та інтенсифікації процесів старіння матеріалу, що обмежує ресурс відновлених посадок.

Запропонований у роботі нанокompозитний матеріал формують на основі еластомеру Ф-40 із введенням металевих наночастинок алюмінію та міді, що виконують функцію структурно-зміцнювальних і теплофізичних модифікаторів. Алюміній, завдяки високій теплопровідності та низькій густині, сприяє формуванню в полімерній матриці системи теплопровідних каналів при порівняно невеликій масовій частці наповнювача, тоді як мідь, крім високої теплопровідності, забезпечує інтенсивну взаємодію на міжфазній межі «полімер – метал» та підвищення адгезійної міцності покриття до сталеві основи. За результатами активного експерименту та регресійного аналізу встановлено оптимальний склад нанокompозиту: еластомер Ф-40 – 100 мас. ч., нанопорошок Al – 2,0 мас. ч., нанопорошок Cu – 1,6 мас. ч.

Узагальнені дані щодо основних експлуатаційно значущих характеристик еластомеру Ф-40 та нанокompозиту на його основі наведено в табл. 4.1. До порівняльного аналізу включено показники умовної теплостійкості, коефіцієнта теплопровідності, адгезійної міцності до сталі, питомої роботи руйнування та коефіцієнтів термостійкості за міцністю й відносним подовженням.

Таблиця 4.1 – Основні експлуатаційні характеристики еластомеру Ф-40 та нанокompозиту на його основі

Показник	Ф-40 (матриця)	Нанокompозит Ф-40 + Al + Cu
Умовна теплостійкість, °С	≈ 100	≈ 123
Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К)	0,56	21,8
Зміна λ порівняно з матрицею	–	у 38,9 рази
Адгезійна міцність до сталі, Н/м	3310	9560
Зміна адгезії	–	у 2,89 рази
Питома робота руйнування, МДж/м ³	< 12,9	≈ 12,9
К σ (термостійкість за міцністю)	1,0 (базове значення)	≈ 1,8
К ϵ (термостійкість за відносним подовженням)	1,0 (базове значення)	≈ 1,4

Дані табл. 4.1 свідчать, що перехід від ненаповненого еластомеру до нанокompозиту на основі Ф-40 супроводжується кратним зростанням теплопровідності (у 38,9 рази) і майже трикратним підвищенням адгезійної міцності до сталі, а також збільшенням умовної теплостійкості приблизно на 20–25 °С. Питома робота руйнування нанокompозиту досягає ≈12,9 МДж/м³, що відповідає високій енергоємності руйнування і є важливим для роботи

тонких покриттів в умовах ударно-вібраційних навантажень. Зростання коефіцієнтів K_{σ} та K_{ϵ} порівняно з базовим еластомером свідчить про вищу термостійкість деформаційно-міцнісних характеристик нанокompозиту при тривалому тепловому впливі.

Оскільки адгезійна міцність безпосередньо визначає надійність з'єднання «корпусна деталь – полімерне покриття – підшипник», доцільно виділити окремо дані щодо адгезії полімеру до сталеві основи (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Адгезійні характеристики еластомеру Ф-40 та нанокompозиту на його основі

Матеріал покриття	Адгезійна міцність до сталі F, Н/м	Відносна зміна порівняно з Ф-40
Еластомер Ф-40 (матриця)	3310	1,00 (базовий рівень)
Нанокompозит Ф-40 + Al + Cu (оптимальний склад)	9560	2,89

Як видно з табл. 4.2, введення наночастинок алюмінію та міді до еластомерної матриці приводить до зростання адгезійної міцності до сталі з ≈ 3310 до ≈ 9560 Н/м, тобто приблизно у 2,9 рази. Це свідчить про формування більш міцних фізико-хімічних зв'язків на межі «полімер – метал» і підвищену стабільність міжфазної зони. При випробуванні з'єднання «метал – покриття» для нанокompозиту спостерігається переважно когезійний характер руйнування (у об'ємі полімерної фази), тоді як для ненаповненого Ф-40 переважає адгезійне руйнування по межі «полімер – метал».

Це є принципово важливим із точки зору довговічності відновлених посадок підшипників, оскільки виключає передчасні відшарування покриття при термоциклуванні та дії змінних навантажень.

Для наочності результати табл. 4.2 доцільно продублювати у вигляді стовпчикової діаграми (рис. 4.1), де два стовпчики відповідають значенням $F = 3310$ та $F = 9560$ Н/м для еластомеру Ф-40 та нанокompозиту відповідно.

Такий спосіб подання матеріалу забезпечує візуальне підкреслення кратного зростання адгезії при переході до нанокомпозиту.

Як впливає з табл. 4.1, одним із найсуттєвіших ефектів наномодифікування еластомеру Ф-40 є різке зростання коефіцієнта теплопровідності λ : від 0,56 до 21,8 Вт/(м·К), тобто майже у 39 разів.

Такий перехід фактично переводить матеріал із класу теплоізоляційних полімерів до класу теплопровідних композитів. Фізично це пов'язано з формуванням у полімерній матриці розгалуженої провідної мережі з металевих наночастинок Al і Cu, що досягається при оптимальному їх вмісті (Al – 2,0 мас. ч., Cu – 1,6 мас. ч.). Після досягнення перколяційного порогу сумарної об'ємної частки наповнювачів теплопровідність різко зростає, оскільки тепло починає переноситися не лише через полімерну фазу, а й по металевих «містках», які створюють шляхи з низьким термічним опором.

Підвищення теплопровідності супроводжується збільшенням умовної теплостійкості матеріалу (з ≈ 100 до ≈ 123 °С), що означає розширення температурного інтервалу, у якому механічні властивості нанокомпозиту залишаються на прийнятному рівні. Одночасно збільшуються коефіцієнти термостійкості K_{σ} та K_{ϵ} , які характеризують збереження міцності та деформативності після термовпливу (табл. 4.1). Таким чином, нанокомпозит Ф-40 + Al + Cu не лише забезпечує посилений тепловідвід із зони контакту «корпус – підшипник», але й краще протистоїть термічній деградації власної структури.

Стендові випробування підшипникових вузлів із посадками, відновленими нанокомпозитом на основі Ф-40, підтвердили, що за однакових умов навантаження температура деталей вузла із нанокомпозитним прошарком є нижчою до 16 °С порівняно з аналогічними вузлами, відновленими ненаповненим полімером.

Це додатково підтверджує ефективність сформованої в нанокомпозиті теплопровідної структури та робить можливим підвищення довговічності відновлених посадок.

4.2. Дослідження довговічності відновлених отворів корпусних деталей

Одним із ключових критеріїв працездатності системи «корпусна деталь – нанокompозитне покриття – підшипник кочення» є довговічність посадок за умов реального навантаження. Для оцінювання ресурсу відновлених отворів корпусних деталей проведено комплекс стендових випробувань на спеціалізованому вібростенді, що моделює роботу підшипникового вузла сільськогосподарської техніки при циклічному радіальному навантаженні до 20 кН з базою навантаження $5,76 \cdot 10^7$ циклів (орієнтовно 330 годин роботи).

Об'єктом ресурсних випробувань були посадки підшипника типорозміру 209 у корпусних деталях, відновлені полімерним шаром на основі еластомеру Ф-40 та нанокompозитом Ф-40 + Al + Cu оптимального складу. Варіювалися товщина полімерного шару, натяги в посадці та вид матеріалу (чистий еластомер / нанокompозит). Ресурс t визначали за кількістю циклів навантаження до настання граничного стану, який встановлювали за комплексом ознак: втрата радіального натягу, поява люфту, перевищення допустимих відхилень геометричних параметрів отвору та/або ознак інтенсивного зносу елементів підшипника.

Загальні умови стендових випробувань узагальнені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Умови стендових випробувань довговічності посадок підшипників, відновлених полімерними матеріалами

Параметр	Позначення	Значення
Тип підшипника	–	Радіальний кульковий підшипник 209
Тип з'єднання	–	«Корпусна деталь – полімерне покриття – підшипник»
Матеріал покриття	–	Еластомер Ф-40; нанокompозит Ф-40 + Al + Cu

Продовження таблиці 4.3

Товщина полімерного шару	$\delta_{p,окр}$, мм	0,05–0,14 (робочий діапазон); контрольні точки 0,10 і 0,125
Діаметральний знос отвору до відновлення	Δd , мм	до 0,25 (рекомендований діапазон застосування нанокompозиту)
Вид навантаження	–	Циклічне радіальне навантаження
Максимальне радіальне навантаження	P, кН	до 20
Частота навантаження	f, Гц	Відповідає 330 год при базі $5,76 \cdot 10^7$ циклів
База навантаження	N, циклів	$5,76 \cdot 10^7$
Критерій граничного стану	–	Втрата натягу, перевищення допустимих зазорів, ознаки втомного руйнування

За результатами випробувань встановлено, що наповнення еластомеру Ф-40 металевими наночастинками приводить до підвищення витривалості матеріалу і, відповідно, до зростання довговічності відновлених посадок підшипників. При однакових умовах навантаження та однаковій геометрії полімерного шару нанокompозит демонструє вищу стійкість до втомного руйнування, що узгоджується з підвищеними значеннями питомої роботи руйнування, адгезійної міцності та теплостійкості, наведеними в попередніх підрозділах.

4.2.1. Результати стендових випробувань ресурсної витривалості посадок

Стенові випробування виконувалися на вібростенді, що забезпечує реалізацію контрольованого циклічного радіального навантаження до 20 кН

при базі $5,76 \cdot 10^7$ циклів (330 годин). Такий режим відповідає інтенсивній експлуатації вузлів ходової частини та трансмісії сільськогосподарських машин. Порівнювалися дві групи зразків:

- посадки, відновлені шаром ненаповненого еластомеру Ф-40;
- посадки, відновлені шаром нанокompозиту на основі Ф-40 з

оптимальним вмістом нанопорошків Al і Cu.

Для кожного варіанта товщини шару $\delta_{\text{рокр}}$ фіксували:

- кількість циклів до настання граничного стану t ;
- характер руйнування (відшарування покриття, втрата натягу, пошкодження підшипника);
- зміну геометричних параметрів отвору (радіальний зазор, овальність).

Якісні результати порівняння поведінки еластомеру та нанокompозиту наведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Якісна оцінка ресурсу посадок підшипників, відновлених еластомером Ф-40 і нанокompозитом на його основі

Матеріал шару	Товщина шару $\delta_{\text{рокр}}$, мм	Характер зміни ресурсу t при зростанні $\delta_{\text{рокр}}$	Типові ознаки граничного стану
Еластомер Ф-40	0,05–0,10	t зростає до $\delta_{\text{рокр}} \approx 0,10$ мм (робоча межа), при подальшому збільшенні товщини шар стає надмірно податливим, ресурс знижується	Втрата натягу, зростання деформацій, локальні відшарування

Продовження таблиці 4.4

Нанокompозит Ф-40 + Al + Cu	0,05– 0,125	t зростає до $\delta_{p\text{окр}} \approx 0,10\text{--}0,125$ мм; у цьому діапазоні забезпечується максимальна витривалість; при більших товщинах спостерігається зниження ресурсу через зростання деформативності	Гладке втомне спрацювання, поодинокі когезійні руйнування в об'ємі шару, збереження адгезії до металу
--------------------------------	----------------	---	---

Схематично типова залежність ресурсу t від товщини полімерного покриття h для нанокompозиту на основі Ф-40 наведена у вигляді графіка (рисунок 4.6). Крива має екстремальний характер:

- у зоні дуже тонких шарів ($h < 0,05\text{--}0,06$ мм) ресурс занижений через недостатню несучу здатність і підвищений рівень контактних напружень;
- у діапазоні $h \approx 0,10\text{--}0,125$ мм ресурс досягає максимуму – полімерний шар достатньо товстий, щоб перерозподіляти навантаження та демпфувати вібрації, але ще не настільки товстий, щоб викликати надмірні пружні деформації;
- при подальшому збільшенні товщини шар стає надмірно податливим, зростають деформації, порушується оптимальний розподіл навантаження в металі корпусу та підшипника, що призводить до зниження ресурсу.

Максимальна допустима товщина покриття для еластомеру Ф-40 становить 0,10 мм: при її перевищенні ресурс вузла різко зменшується. Для нанокompозиту на основі Ф-40 допустима товщина шару без істотного зниження довговічності збільшується до 0,125 мм, що підтверджено як розрахунками, так і стендовими випробуваннями.

Суттєвим є той факт, що навіть при однаковій товщині шару (0,10 мм) нанокompозит забезпечує більш високу витривалість порівняно з чистим еластомером, що обумовлено:

- підвищеною питомою роботою руйнування;
- кращою адгезійною міцністю до сталі;
- підвищеною теплопровідністю та теплостійкістю, що забезпечують сприятливіший тепловий режим роботи підшипника.

4.2.2. Вплив товщини нанокompозитного шару та натягів на довговічність вузла

Довговічність відновлених посадок визначається сумісною дією двох груп факторів:

1. геометричних параметрів полімерного шару – насамперед товщини покриття $\delta_{p,окр}$;
2. умов навантаження контакту – у першу чергу величини радіального натягу між зовнішнім кільцем підшипника та корпусною деталлю.

Як показали дослідження, для нанокompозиту на основі Ф-40 існує оптимальний інтервал товщин шару, в межах якого досягається максимальна довговічність посадки. За результатами розрахунків і стендових випробувань цей інтервал становить $\delta_{p,окр} \approx 0,10-0,125$ мм.

При товщині полімерного шару $h < 0,10$ мм сформований прошарок не забезпечує достатньої площі контакту між покриттям і металевою поверхнею підшипника, а також обмежує можливість ефективного перерозподілу контактних і дотичних напружень. За таких умов у зоні сполучення «полімер – метал» виникають високі локальні напруження, зумовлені концентрацією навантаження на окремих мікроділянках контакту. Це призводить до інтенсифікації процесів мікротріщиноутворення, прискореного втомного руйнування полімерного покриття та зростання контактних пошкоджень елементів підшипника, що в сукупності істотно знижує ресурс вузла.

За надмірного збільшення товщини шару ($h > 0,125$ мм) змінюється характер деформування вузла в цілому. Зростає сумарна деформативність полімерного прошарку, що супроводжується підвищеними пружними прогинами під навантаженням. У результаті погіршуються умови роботи підшипника, виникають перекоси кілець, порушується співвісність елементів та формується нерівномірний розподіл навантаження по тілах кочення. Це спричиняє локальне перевантаження окремих контактних зон, зростання контактних напружень і прискорене зношування, що також негативно впливає на довговічність підшипникового вузла.

Таким чином, існує оптимальний інтервал товщини полімерного покриття, за якого досягається баланс між здатністю шару до перерозподілу напружень і допустимим рівнем деформаційної податливості вузла. У цьому діапазоні полімерний прошарок ефективно виконує демпфувальну та вирівнювальну функції, забезпечує стабільний контакт між елементами сполучення та сприяє максимальному ресурсу посадки підшипника.

Якісний взаємозв'язок між товщиною шару та ресурсом нанокompозитної посадки узагальнено в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Вплив товщини шару нанокompозиту Ф-40 + Al + Cu на довговічність посадки

Товщина шару $\delta_{p,окр}$, мм	Характеристика стану шару	Очікуваний рівень ресурсу t	Основні обмежувальні фактори
< 0,05– 0,06	Дуже тонкий шар, неповне вирівнювання мікронерівностей, високі контактні напруження	Занижений	Локальне перевищення напружень, прискорене спрацювання

Продовження таблиці 4.5

$\approx 0,10$	Робоча межа для еластомеру Ф-40; нижня межа оптимальної зони для нанокompозиту	Підвищений	Баланс жорсткості та демпфування
0,10– 0,125	Оптимальний діапазон для нанокompозиту	Максимальний	Забезпечується компроміс між жорсткістю і пружністю
> 0,125– 0,14 і більше	Надмірна товщина, зростання деформативності	Знижений	Перекося, збільшення прогинів, нерівномірне навантаження підшипника

Другим важливим фактором є натяг у посадці. З одного боку, достатній натяг необхідний для забезпечення надійної фіксації зовнішнього кільця підшипника та реалізації розрахункової жорсткості вузла; з іншого – надмірний натяг призводить до підвищення напружень у полімерному прошарку та металі корпусної деталі.

За результатами розрахунків і експериментальної оцінки встановлено, що для корпусних деталей із діаметром посадкового отвору під підшипник 209 нанесення нанокompозитного прошарку товщиною 0,10–0,125 мм дозволяє забезпечити раціональні значення натягів у межах, які відповідають типовим посадкам з натягом для вузлів важконавантажених підшипників. При цьому напруження в нанокompозиті не перевищують допустимих значень, а запас міцності за втому залишається достатнім упродовж усього ресурсу вузла.

Узагальнюючи результати досліджень, можна сформулювати такі положення:

- нанокompозит на основі Ф-40 дозволяє розширити допустимий діапазон товщини полімерного шару без істотного зниження довговічності з 0,10 мм (для чистого еластомеру) до 0,125 мм;
- у діапазоні $\delta_{\text{рокр}} \approx 0,10\text{--}0,125$ мм забезпечується максимальний ресурс посадок, обумовлений оптимальним поєднанням жорсткості, демпфуючої здатності та теплофізичних властивостей нанокompозиту;
- рекомендовано відновлювати корпусні деталі з діаметральним зносом посадкових отворів до 0,25 мм, що забезпечує можливість формування нанокompозитного шару у зазначеному оптимальному діапазоні товщин без порушення геометрії й без надмірного зростання деформативності вузла.

Ці результати є основою для подальшої оптимізації технології відновлення, вибору режимів нанесення нанокompозитного шару та калібрування отворів, а також для розробки практичних рекомендацій щодо застосування розробленого матеріалу в ремонтному виробництві сільськогосподарської техніки.

4.3. Аналіз термостійкості, теплопровідності та міцності відновлених з'єднань

Забезпечення стабільного теплового та напружено-деформованого стану у з'єднанні типу «корпусна деталь – полімерне (нанокompозитне) покриття – підшипник кочення» є принциповою умовою довговічності відновлених посадок. Ненаповнений еластомер Ф-40, хоч і є технологічно зручним матеріалом для формування покриттів, характеризується відносно низькою теплостійкістю (порядку 100 °С), малою теплопровідністю ($\lambda \approx 0,56$ Вт/(м·К)) та базовим рівнем термостійкості за міцністю і деформацією ($K_{\sigma} \approx 1,0$, $K_{\varepsilon} \approx 1,0$).

Уведення до матриці Ф-40 металевих наночастинок алюмінію та міді кардинально змінює теплофізичний та ресурсний потенціал покриття. Для

розробленого нанокомпозиту теплостійкість зростає до ≈ 123 °С (у 1,23 рази відносно вихідного еластомеру), коефіцієнт теплопровідності – до $\lambda \approx 21,8$ Вт/(м·К), що відповідає збільшенню в 38,9 рази порівняно з Ф-40. Коефіцієнти старіння за міцністю та відносним подовженням для нанокомпозиту досягають значень $K_{\sigma} \approx 1,8$ і $K_{\epsilon} \approx 1,4$, що свідчить про суттєве пригнічення деградації деформаційно-міцнісних властивостей при тривалому термовпливі.

У підшипниковому вузлі це проявляється у зміні характеру теплового балансу: завдяки підвищеній теплопровідності нанокомпозитний шар не є теплоізоляційною «прокладкою» між корпусом та підшипником, а, навпаки, працює як теплопровідний елемент, який інтенсивно відводить тепло в масив металу корпусної деталі. Це забезпечує більш рівномірний температурний розподіл по перерізу вузла та зменшення локальних температурних максимумів у зоні контакту тіл кочення, доріжок і полімерного прошарку.

Узагальнені дані щодо теплофізичних і термостійкісних параметрів системи «корпус – покриття – підшипник» для випадку застосування еластомеру Ф-40 та нанокомпозиту наведено в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Порівняльні теплофізичні та термостійкісні показники відновлених з'єднань

Показник	Вузол з покриттям Ф-40	Вузол з нанокомпозитом Ф-40 + Al + Cu
Умовна теплостійкість матеріалу, °С	≈ 100	≈ 123
Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К)	0,56	21,8
Відносна зміна λ	–	у 38,9 рази більше
Коефіцієнт термостійкості за міцністю K_{σ}	$\approx 1,0$ (базовий рівень)	$\approx 1,8$

Продовження таблиці 4.6.

Коефіцієнт термостійкості за подовженням K_ϵ	$\approx 1,0$ (базовий рівень)	$\approx 1,4$
Температура деталей підшипникового вузла	Базове значення	до $16\text{ }^\circ\text{C}$ нижча від вузла з ненаповненим полімером

За результатами розрахунково-експериментального аналізу показано, що підвищення теплопровідності та термостійкості нанокompозитного шару безпосередньо відображається на зменшенні температури деталей підшипникового вузла – різниця може досягати $\approx 16\text{ }^\circ\text{C}$ у порівнянні з вузлами, відновленими ненаповненими полімерними вкладками.

Це, у свою чергу, знижує термічні напруження у матеріалі корпусу і підшипника та уповільнює процеси старіння і розрідження мастильного шару. Сукупність перелічених факторів приводить до зростання ресурсу посадок та зменшення ймовірності відмов, обумовлених тепловими перевантаженнями.

Для ілюстрації взаємозв'язку «склад нанокompозиту – теплофізичні характеристики – тепловий режим – напружено-деформований стан – ресурс вузла» доцільно використовувати узагальнену структурно-логічну схему (аналогічну рис. 2.10 дисертації), де вхідним параметром виступають концентрації наночастинок Al і Cu, а вихідним – ресурс вузла «корпус – підшипник» при заданому режимі навантаження.

4.3.1. Порівняння теплового стану вузлів з еластомером Ф-40 та нанокompозитом

Порівняльний аналіз теплового стану підшипникових вузлів, відновлених ненаповненим еластомером Ф-40 і нанокompозитом на його основі, ґрунтується на результатах стендових досліджень теплового балансу та розрахунково-експериментального моделювання. У обох випадках

розглядається однаковий тип підшипника та рівень навантаження, відмінність полягає лише в теплофізичних характеристиках проміжного шару.

У вузлі з покриттям з Ф-40 полімерна фаза являє собою теплоізоляційний прошарок між металевою масою корпусу і зовнішнім кільцем підшипника. Внаслідок низької теплопровідності $\lambda \approx 0,56 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ та обмеженої теплостійкості близько $100 \text{ }^\circ\text{C}$ при тривалій експлуатації у зоні контакту формується підвищений температурний градієнт, а локальна температура в області тіл кочення і доріжок наближається до граничних значень для мастильного матеріалу та полімеру. Це прискорює теплове старіння еластомеру, погіршує умови роботи мастильної плівки й підвищує ризик термічного пошкодження поверхонь кочення.

Вузол із нанокompозитним прошарком характеризується принципово іншим тепловим режимом. Висока теплопровідність $\lambda \approx 21,8 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ дозволяє віднести нанокompозит до групи теплопровідних полімерних матеріалів, які забезпечують інтенсивний відвід тепла від зони контакту в метал корпусу. При цьому локальні піки температури в області тіл кочення і доріжок згладжуються, а температурне поле стає більш рівномірним за радіальним напрямком. На рівні вузла це проявляється у зниженні робочої температури деталей підшипникового вузла до $16 \text{ }^\circ\text{C}$ порівняно з аналогічними вузлами з ненаповненими полімерними вкладками.

Для узагальненої оцінки теплового стану доцільно використовувати якісну порівняльну характеристику (табл. 4.7).

Таблиця 4.7 – Якісне порівняння теплового стану підшипникових вузлів з покриттям Ф-40 та нанокompозитом

Характеристика	Вузол з покриттям Ф-40	Вузол з нанокompозитом Ф-40 + Al + Cu
----------------	------------------------	--

Рівень локальних температур у зоні контакту	Підвищений, наближений до меж теплостійкості полімеру	Помірний, нижчий за рахунок інтенсивного тепловідводу
Радіальний температурний градієнт	Виражений, різкий перепад температур	Згладжений, більш рівномірний розподіл
Характер теплового балансу	Полімерний шар працює як теплоізолятор	Нанокompозитний шар працює як теплопровідний елемент
Стан мастильного шару	Підвищена тенденція до розрідження та деградації	Стабільніший, зменшення ризику перегріву
Очікуваний вплив на ресурс	Обмеження ресурсу тепловими факторами	Підвищення ресурсу за рахунок покращеного теплового стану

Таким чином, підвищення теплопровідності та теплостійкості нанокompозиту забезпечує принципове покращення теплового стану підшипникового вузла, що є одним з ключових механізмів зростання його ресурсу.

4.3.2. Вплив теплопровідності нанокompозиту на температурний режим і напружений стан

Вплив теплопровідності нанокompозиту на температурний режим та напружений стан вузла проявляється у двох взаємопов'язаних аспектах:

1. зміні розподілу температур в елементах вузла,

2. модифікації напружено-деформованого стану за рахунок зменшення термічних напружень і градієнтів деформацій.

Підвищення λ з 0,56 до 21,8 Вт/(м·К) переводить нанокompозитний прошарок із ролі основного теплового опору в ролі активного провідника тепла. У спрощеній одновимірній моделі теплового потоку через «підшипник – полімерний шар – корпус» сумарний тепловий опір R для ділянки полімеру пропорційний товщині шару та обернено пропорційний λ . При незмінній товщині зменшення R майже у 40 разів означає, що перепад температур на полімерному шарі різко знижується, а основна частина перепаду переноситься в інші елементи системи із більшим тепловим опором. На практиці це означає:

- менший перегрів нанокompозитного прошарку;
- зниження температурних напружень у матеріалі;
- більш сприятливі умови для роботи мастила.

З урахуванням підвищеної теплостійкості (до ≈ 123 °С) та збільшених коефіцієнтів старіння K_{σ} і K_{ϵ} , нанокompозит зберігає несучу здатність і деформативність у ширшому діапазоні температур та при тривалому термовпливі. Це призводить до зменшення швидкості накопичення пошкоджень у полімерному шарі та на міжфазній межі «полімер – метал» при багаточиклових навантаженнях. З позицій механіки руйнування це означає зниження швидкості росту мікротріщин і стабілізацію мікроструктурного стану матеріалу у приповерхневих шарах.

Важливо, що зменшення температурних градієнтів напряму впливає на напружено-деформований стан корпусу та зовнішнього кільця підшипника. При роботі вузла з покриттям Ф-40 значний перепад температур між зоною контакту і масивом корпусу викликає неоднорідні термічні розширення, що додатково навантажують зону посадки, сприяють виникненню термічних напружень розтягнення в поверхневому шарі корпусу і стиску в глибині матеріалу. У разі нанокompозитного прошарку, завдяки вирівнюванню температурного поля, термічні напруження зменшуються, а сумарний

напружений стан наближається до такого, що визначається лише механічним навантаженням.

Якісний вплив підвищеної теплопровідності на температурний режим і напружений стан можна узагальнити в табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Якісний вплив теплопровідності нанокompозиту на температурний режим і напружений стан вузла

Параметр	Низька λ (Ф-40)	Висока λ (нанокompозит Ф-40 + Al + Cu)
Перепад температур на полімерному шарі	Значний, локальний перегрів шару	Зменшений, температура шару наближена до температури корпусу
Розподіл температур по радіусу	Різкий градієнт	Згладжений профіль
Рівень термічних напружень	Підвищений, додаткове навантаження посадки	Знижений, домінує механічна складова
Швидкість термостаріння	Підвищена	Знижена (K_{σ} , $K_{\epsilon} > 1$ для нанокompозиту)
Ймовірність термічного пошкодження	Вища	Нижча

Отримані результати свідчать, що підвищена теплопровідність нанокompозиту Ф-40 + Al + Cu не лише покращує тепловий режим підшипникових вузлів, але й виступає одним із ключових чинників формування сприятливого напружено-деформованого стану в зоні посадки. У поєднанні з підвищеною теплостійкістю та деформаційно-міцнісними

характеристиками це забезпечує суттєве зростання довговічності відновлених з'єднань, що підтверджено як лабораторними, так і виробничими випробуваннями.

4.4. Оптимізація складу нанокompозитних матеріалів

Ефективність відновлення посадкових отворів корпусних деталей сільськогосподарської техніки нанокompозитами на основі еластомеру Ф-40 істотно залежить від вмісту наночастинок металів у полімерній матриці. З одного боку, введення нанорозмірних частинок алюмінію та міді забезпечує підвищення деформаційно-міцнісних, адгезійних і теплофізичних характеристик покриття; з іншого – надмірна кількість наповнювачів може призводити до агломерації частинок, локальної концентрації напружень і зниження тріщиностійкості матеріалу. Тому необхідним етапом досліджень стала багатофакторна оптимізація складу нанокompозиту з використанням методів планування експерименту та регресійного аналізу.

У межах цієї роботи оптимізацію проводили за інтегральним критерієм – питомою роботою руйнування плівок нанокompозиту α_p , МДж/м³, яка відображає енергомісткість процесу руйнування й комплексно враховує рівень міцності, пластичності та тріщиностійкості матеріалу. Як незалежні фактори обрано вміст алюмінієвих наночастинок X_1 та мідних наночастинок X_2 , виражений у масових частинах на 100 мас. ч. еластомеру Ф-40.

4.4.1. Побудова регресійних моделей залежності властивостей від складу нанокompозиту

Для кількісної оцінки впливу складу нанокompозиту на його експлуатаційні властивості реалізовано активний багатофакторний експеримент за композиційним планом типу В₂. У зоні, що досліджувалася, фактори змінювалися у технологічно доцільних межах, які забезпечують формування однорідних плівок без видимих дефектів та зберігають прийнятну в'язкість робочого розчину при нанесенні.

На попередньому етапі були відібрані характерні склади нанокompозиту, що дозволяють оцінити вплив зростання концентрації наночастинок Al і Cu:

Таблиця 4.9 – Характерні склади нанокompозиту Ф-40 + Al + Cu, використані для оптимізації

Склад	Вміст Al, мас. ч.	Вміст Cu, мас. ч.	Характерні особливості впливу на властивості
№ 1	1,0	0,6	Початкове зростання модуля пружності й адгезії; сітчасті структури ще недостатньо розвинені, покращення властивостей обмежене.
№ 2	2,0	1,6	Формування розвиненої перколяційної сітки наночастинок, максимальний приріст міцності, питомої роботи руйнування та адгезійної міцності.
№ 3	3,0	2,6	Подальше збільшення вмісту наповнювачів не дає пропорційного приросту характеристик; спостерігається тенденція до стабілізації або незначного зниження через можливу агломерацію наночастинок.

Додатково, у попередніх серіях експериментів досліджено чотири склади з дещо вужчим діапазоном концентрацій (Al = 1,6–2,2 мас. ч.; Cu = 1,4–2,0 мас. ч.), для яких показано, що найбільша тимчасова опірність розриву $\sigma_p = 16,11$ МПа реалізується у складу № 2; збільшення міцності порівняно з ненаповненим еластомером становить 23 %, а відносне подовження

зменшується з ≈ 62 до ≈ 54 %, що відповідає переходу матеріалу до більш «армованого» стану.

За результатами активного експерименту побудовано регресійну модель другого порядку, що описує залежність питомої роботи руйнування плівок нанокompозиту від вмісту наночастинок алюмінію та міді у натуральних координатах:

$$Y = -15,296 + 18,903 X_1 + 13,509 X_2 - 0,15 X_1 X_2 - 5,08 X_1^2 - 4,08 X_2^2,$$

де

Y – питома робота руйнування α_p , МДж/м³;

X_1 – вміст наночастинок Al, мас. ч.;

X_2 – вміст наночастинок Cu, мас. ч.

Аналіз отриманого рівняння свідчить, що лінійні коефіцієнти при X_1 та X_2 додатні, тобто за низьких концентрацій як алюмінію, так і мідь сприяють зростанню α_p за рахунок формування більш жорсткої і тріщиностійкої структури. Водночас квадратичні члени з від'ємними коефіцієнтами ($-5,08 X_1^2$ та $-4,08 X_2^2$) відображають наявність внутрішнього максимуму функції, після якого подальше збільшення вмісту наповнювачів вже не призводить до покращення властивостей, а може навіть їх погіршувати через агломерацію частинок та підвищення концентрації напружень у матриці.

Член взаємодії $-0,15 X_1 X_2$ свідчить про те, що комбінований вплив алюмінію й міді нелінійний: ефект одночасного підвищення обох концентрацій дещо менший, ніж проста сума окремих ефектів, що узгоджується з фізичною картиною формування спільних кластерів наночастинок та їх «перенасичення» у матриці.

На основі регресійного рівняння побудовано 3D-поверхню відгуку та рисунок ізоліній, які доцільно подати у вигляді:

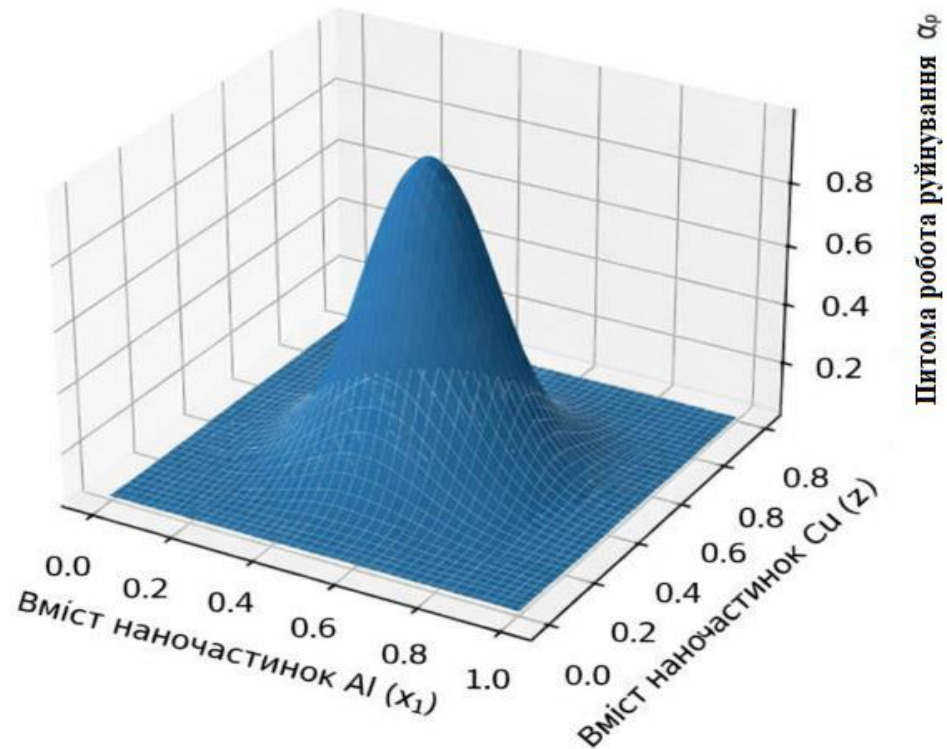


Рисунок 4.7 – Поверхня відгуку залежності питомої роботи руйнування α_p від вмісту наночастинок Al (X_1) та Cu (X_2) – тривимірне зображення з чітко вираженим максимумом у центральній області

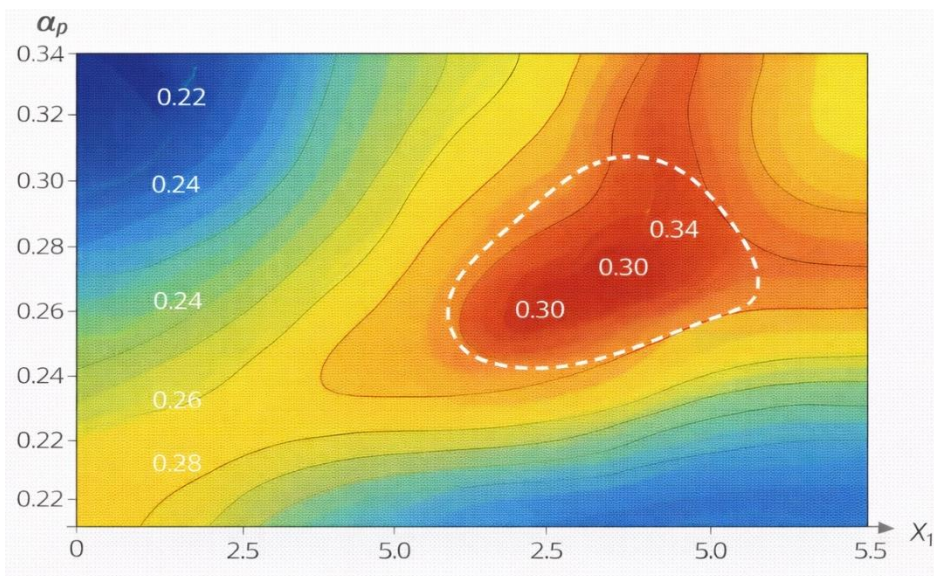


Рисунок 4.8 – Ізолінії поверхні відгуку α_p у площині « X_1 – X_2 » – контурний графік, на якому окреслено область високих значень α_p , що відповідає раціональним комбінаціям вмісту наночастинок.

Аналіз поверхні відгуків показав, що локальний максимум питомої роботи руйнування ($\alpha_p \approx 13,0$ МДж/м³) досягається в околі складу: еластомер Ф-40 – 100 мас. ч., Al – $\approx 1,9$ мас. ч., Si – $\approx 1,8$ мас. ч.

Це свідчить про наявність внутрішньої області складів, у межах якої формується оптимальний баланс між ефектом армування наночастинками й збереженням достатньої пластичності та тріщиностійкості зв'язаної полімерної матриці.

Таким чином, побудована регресійна модель дозволяє:

- оцінити внесок кожного з факторів X_1 та X_2 у формування експлуатаційних властивостей нанокompозиту;
- виявити область оптимальних концентрацій наночастинок;
- використовувати рівняння як інженерний інструмент для подальшої оптимізації складу нанокompозиту з урахуванням комплексних критеріїв (міцність, адгезія, теплопровідність).

4.4.2. Визначення області раціональних концентрацій нанонаповнювачів

Хоча точка математичного максимуму α_p за регресійною моделлю відповідає складу, близькому до 1,9 мас. ч. Al та 1,8 мас. ч. Si, на практиці доцільно враховувати комплекс властивостей нанокompозиту та технологічні обмеження процесу відновлення. У цьому контексті ключовими є не тільки значення питомої роботи руйнування, а й:

- адгезійна міцність до сталі;
- теплопровідність і теплостійкість покриття;
- реологічні характеристики робочого розчину (зручність приготування та нанесення);
- стабільність складу при масштабуванні технології.

Результати узагальнених досліджень показали, що нанокompозит складу:

- Ф-40 – 100 мас. ч.;

- Al – 2,0 мас. ч.;
- Cu – 1,6 мас. ч.

забезпечує не лише високі значення питомої роботи руйнування ($\approx 12,9$ МДж/м³), а й максимальну адгезійну міцність до сталі – близько 9560 Н/м, що приблизно у 2,89 рази перевищує аналогічний показник ненаповненого еластомеру.

Одночасно для цього складу фіксується істотне підвищення теплофізичних характеристик: коефіцієнт теплопровідності зростає з 0,56 до 21,8 Вт/(м·К), а умовна теплостійкість – з ≈ 100 до ≈ 123 °С.

Така комбінація параметрів є принципово важливою для відновлених посадок підшипників, оскільки забезпечує зниження робочих температур у зоні контакту «корпус – зовнішнє кільце підшипника», стабільність розмірів та запобігання тепловим розуцільненням з'єднання.

Для наочного відображення впливу нанорозмірних наповнювачів на комплекс показників доцільно використовувати узагальнюючу таблицю, сформовану на основі експериментальних даних.

Таблиця 4.4.2 – Вплив нанонаповнювачів Al і Cu на основні експлуатаційні характеристики покриттів

Показник	Базовий матеріал (Ф-40)	Нанокompозит Ф-40 + Al + Cu (100/2,0/1,6)	Зміна показника
Умовна теплостійкість, °С	≈ 100	≈ 123	+23 %
Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К)	0,56	21,8	у 38,9 рази ↑
Адгезійна міцність до сталі, Н/м	3310	9560	у 2,89 рази ↑
Питома робота руйнування, МДж/м ³	< 12,9	$\approx 12,9$	істотне зростання

Аналіз таблиці й поверхні відгуку дозволяє сформулювати область раціональних концентрацій нанонаповнювачів, яка забезпечує не локальний математичний максимум лише одного показника, а компромісний максимум за комплексом критеріїв:

- вміст наночастинок алюмінію $X_1 \approx 1,8-2,1$ мас. ч.;
- вміст наночастинок міді $X_2 \approx 1,6-1,8$ мас. ч.

У межах цієї області:

- питома робота руйнування зберігається близькою до максимальних значень ($\alpha_p \approx 12,8-13,0$ МДж/м³);
- забезпечується високий рівень адгезійної міцності й модулю пружності;
- досягається необхідне збільшення теплопровідності та теплостійкості без суттєвого погіршення технологічних властивостей композиції.

З практичної точки зору, вибір складу Ф-40 – 100 мас. ч., Al – 2,0 мас. ч., Cu – 1,6 мас. ч. можна розглядати як технологічно оптимальний. Саме цей варіант:

- лежить усередині області раціональних концентрацій, де поверхня відгуку має полого плато максимуму;
- допускає допустимі коливання дозування наночастинок без істотного погіршення властивостей (важливо для реальних умов ремонтного виробництва);
- забезпечує одночасне підвищення деформаційно-міцнісних, адгезійних та теплофізичних характеристик покриття й підтверджену експериментами довговічність відновлених посадок.

Графічно область раціональних концентрацій доцільно показати на рисунку 4.10 у вигляді виділеної зони (наприклад, заштрихованого або контурного «острова») на площині факторів X_1-X_2 з накладеними ізолініями α_p . Такий підхід наочно демонструє, що оптимізація здійснюється не щодо окремої точки, а щодо певної області стійких оптимальних рішень, що

особливо важливо для впровадження технології в умовах серійного ремонтного виробництва.

У підсумку, проведена оптимізація складу нанокompозиту Φ -40 + Al + Si дозволила:

- сформувані кількісно обґрунтовані уявлення про вплив концентрацій Al та Si на комплекс експлуатаційних характеристик;
- розробити регресійну модель, придатну для інженерних розрахунків і подальших оптимізаційних досліджень;
- виділити область раціональних концентрацій нанонаповнювачів і обґрунтувати вибір технологічно оптимального складу, який надалі використано в розробленій технології відновлення посадкових отворів корпусних деталей сільськогосподарської техніки.

4.5. Оптимізація технологічних параметрів процесу відновлення посадкових отворів

Оптимізація технологічних параметрів процесу відновлення посадкових отворів корпусних деталей нанокompозитом на основі еластомеру Φ -40 передбачає узгоджений вибір трьох ключових груп факторів:

- складу та властивостей нанокompозитного матеріалу;
- геометричних параметрів ріжучого інструменту для калібрування і кінематичних режимів обробки;
- натягів у з'єднанні «корпус – підшипник» і товщини відновлювального полімерного шару.

Сукупний вплив цих чинників визначає рівень технологічної пошкоджуваності покриття, точність геометрії відновлених отворів, тепловий стан підшипникового вузла і, в підсумку, довговічність посадок за базою випробувань $5,76 \cdot 10^7$ циклів навантаження при радіальній силі до 20 кН.

Проведені дослідження показали, що раціональна комбінація параметрів калібрування (переднього та заднього кутів ріжучої кромки, подачі, швидкості різання) та параметрів відновлення (товщина нанокompозитного шару,

величина натягу в посадці) дозволяє одночасно забезпечити мінімальне зусилля різання, низьку площу руйнування полімерного шару, прийнятні показники овальності та відхилення розміру, а також ресурс роботи вузла не нижчий за базову витривалість при знижених температурах корпусної втулки та зовнішнього кільця підшипника.

Для кількісної оцінки впливу технологічних параметрів на показники якості застосовано методи багатofакторного планування експерименту та регресійного аналізу. На основі масиву експериментальних даних побудовано регресійні моделі, що пов'язують параметри процесу калібрування з критеріями якості покриття та геометрії відновлених отворів, а також моделі, які описують взаємозв'язок між товщиною полімерного шару, теплопровідністю, температурним режимом вузла і ресурсом посадок.

4.5.1. Регресійні моделі впливу режимів калібрування на якість відновлених отворів

Для теоретичного та експериментального обґрунтування раціональних режимів калібрування отворів із нанокompозитним покриттям на основі еластомеру Ф-40 як основні керовані фактори прийнято: передній кут γ і задній кут α ріжучої кромки калібру-різця, подачу на оберт s , швидкість різання v та глибину різання t . Вихідними параметрами, що характеризують якість відновлення, обрано площу руйнування полімерного шару $S_{руйн}$ (сукупність відшарувань, сколів, тріщин), овальність $\epsilon_{ов}$ отвору та відхилення діаметра Δ від номінального значення. Додатково для оцінки навантаженості покриття під час обробки аналізувалося зусилля різання F .

Експериментальні дослідження залежності зусилля різання F від переднього кута γ виявили практично лінійну спадну залежність: при $\gamma = 50^\circ$ зусилля різання покриття нанокompозиту становить $F \approx 2,32$ кН, при $\gamma = 60^\circ$ – $F \approx 2,14$ кН, а при $\gamma = 70^\circ$ досягається мінімальне значення $F \approx 1,94$ кН. Таким чином, збільшення γ від 50° до 70° зменшує зусилля різання приблизно на 21 %, що безпосередньо знижує рівень напружень у приповерхневому шарі

покриття та ймовірність формування дефектів типу мікротріщин і відшарувань. Цю закономірність можна описати лінійною регресійною моделлю виду

$$F = b_0 + b_1\gamma,$$

де $b_1 < 0$, що узгоджується з експериментальними даними про зниження F зі збільшенням γ .

Пошкоджуваність нанокompозитного покриття після калібрування оцінювали за часткою площі руйнування $S_{руйн}$ від загальної площі поверхні отвору. Встановлено, що при $\gamma = 50^\circ$ $S_{руйн}$ досягає 13,28 %, при $\gamma = 60^\circ$ зменшується до 10,23 %, а при $\gamma = 70^\circ$ фіксується мінімальне значення $S_{руйн} = 5,12$ %. Отже, збільшення γ від 50° до 70° знижує площу руйнування в 2,6 рази порівняно з $\gamma = 50^\circ$ і в 2,0 рази порівняно з $\gamma = 60^\circ$. На основі цих даних побудовано регресійну залежність загального вигляду

$$S_{руйн} = a_0 + a_1\gamma + a_2s + a_3v + a_4t + \dots,$$

у якій коефіцієнт при γ має від'ємний знак, що відображає зменшення площі руйнування зі збільшенням переднього кута. Параметри подачі s та глибини різання t , навпаки, мають тенденцію до позитивного впливу на $S_{руйн}$, оскільки збільшення подачі й глибини інтенсифікує силове та теплове навантаження на шар.

Паралельно досліджувалися геометричні показники точності – овальність $\varepsilon_{ов}$ та відхилення діаметра Δ . Встановлено, що застосування калібра-різця з $\gamma = 70^\circ$ дозволяє знизити овальність до 8 мкм, що в 1,75 та 1,5 рази менше, ніж при $\gamma = 50^\circ$ та $\gamma = 60^\circ$ відповідно, а відхилення діаметра Δ зменшується до 18 мкм (у 1,67 та 1,39 рази менше порівняно з варіантами з меншими значеннями γ). Для опису цих закономірностей побудовано окремі регресійні моделі:

$$\varepsilon_{ов} = c_0 + c_1\gamma + c_2s + c_3v + \dots,$$

$$\Delta = d_0 + d_1\gamma + d_2s + d_3v + \dots.$$

Аналіз коефіцієнтів моделей показав, що найбільший вплив на ϵ_{ov} та Δ має саме передній кут γ , тоді як зміна подачі s і швидкості різання v у досліджуваному діапазоні чинить другорядний вплив порівняно з геометрією ріжучої кромки.

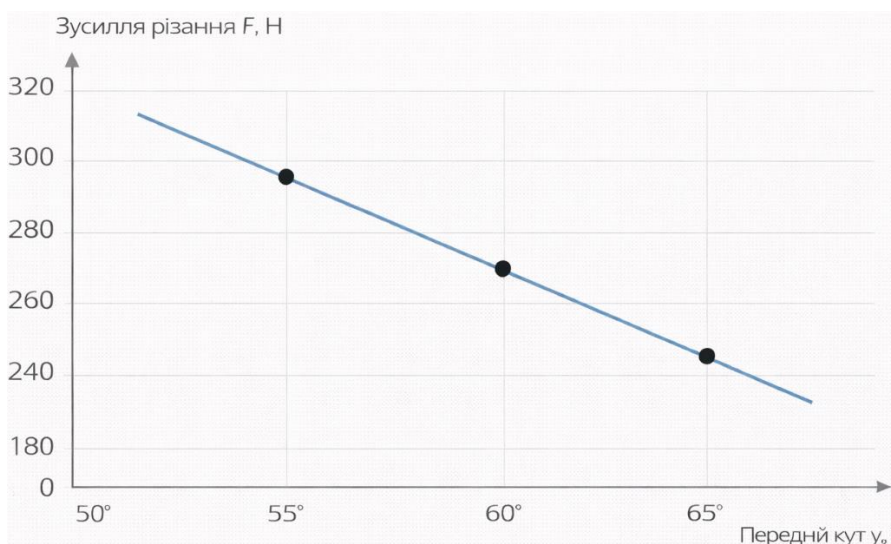


Рисунок 4.9. Лінійна залежність зусилля різання F від переднього кута γ (для значень $\gamma=50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$).

Вибір поєднання $\gamma = 70^\circ$ і $\alpha = 10^\circ$ забезпечує одночасне досягнення мінімального зусилля різання, мінімальної площі руйнування полімерного шару та найкращих показників геометричної точності отвору.

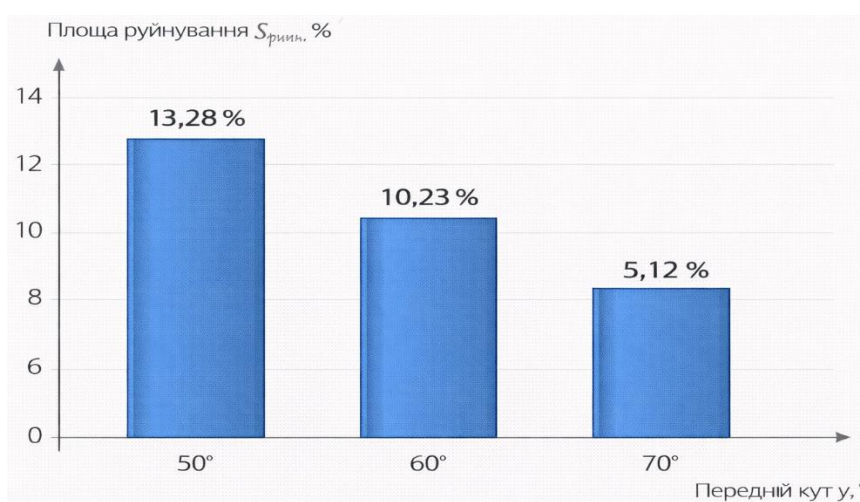


Рисунок 4.10. Діаграма залежності площі руйнування покриття $S_{руйн}$ від переднього кута γ (із відображенням значень 13,28; 10,23; 5,12 %)

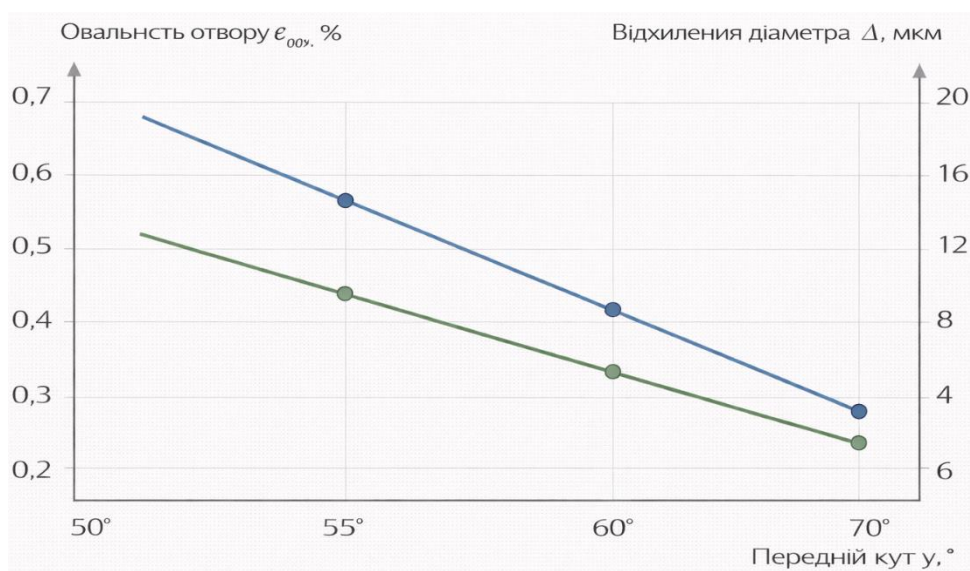


Рисунок 4.11 Діаграма залежностей овальності отвору ϵ_{ov} та відхилення діаметра Δ від переднього кута γ при обробці отворів

Узагальнюючи результати регресійного аналізу, можна зробити висновок, що оптимізація режимів калібрування з позицій комплексного критерію «мінімум зусилля різання – мінімум пошкоджуваності – максимум точності» приводить до вибору раціональних геометричних параметрів калібра-різця $\gamma = 70^\circ$, $\alpha = 10^\circ$ та помірних режимів різання, які не викликають надмірного тепловиділення в зоні контакту «ріжуча кромка – покриття».

4.5.2. Вибір раціональних натягів і товщини нанокompозитного шару

Другим ключовим напрямом оптимізації технологічного процесу є раціональний вибір товщини нанокompозитного шару $\delta_{покр}$ та натягів u з'єднанні «корпус – підшипник». Саме ці параметри визначають напружено-деформований і тепловий стан вузла та, відповідно, довговічність відновлених посадок. При надмірній товщині полімерного шару збільшується його деформативність, зростає нерівномірність розподілу контактних напружень і температурних градієнтів; при недостатньому натягу підвищується ризик мікропровертання зовнішнього кільця підшипника, що викликає абразивне зношування і передчасну втрату працездатності посадки.

Розрахунки та стендові випробування показали, що для базового еластомеру Ф-40 гранична робоча товщина покриття становить близько 0,10

мм: при подальшому збільшенні $\delta_{\text{покр}}$ ресурс роботи посадки починає знижуватися внаслідок зростання деформаційних і теплових навантажень на полімерний шар. Для нанокompозиту на основі Ф-40 ефективний діапазон товщин розширюється до 0,10–0,125 мм, при якому забезпечується ресурс роботи посадки не нижчий за прийняту базу $5,76 \cdot 10^7$ циклів при радіальному навантаженні до 20 кН.

Таке розширення робочого діапазону товщин пояснюється, з одного боку, підвищеною теплопровідністю нанокompозиту ($\lambda_{\text{эф}} \approx 21,8$ Вт/(м·К), що у 38,9 рази більше, ніж у вихідного еластомеру Ф-40), а з іншого – зростанням теплостійкості та термостійкості, про що свідчить збільшення температури початку інтенсивного старіння до ≈ 123 °С і зростання коефіцієнтів старіння за міцністю в 1,8 рази, а за деформацією – в 1,4 рази. У результаті при $\delta_{\text{покр}} = 0,10\text{--}0,125$ мм температура деталей підшипникового вузла знижується на 10–16 °С порівняно з варіантом з ненаповненим еластомером, що безпосередньо сприяє підвищенню ресурсу.

У таблиці 4.8 наведено рекомендовані параметри товщини покриття та бази навантаження для матеріалу Ф-40 і нанокompозиту Ф-40 + Al + Cu із зазначенням $\delta_{\text{покр}}$, ефективного коефіцієнта теплопровідності $\lambda_{\text{эф}}$, бази навантаження та якісною оцінкою довговічності.

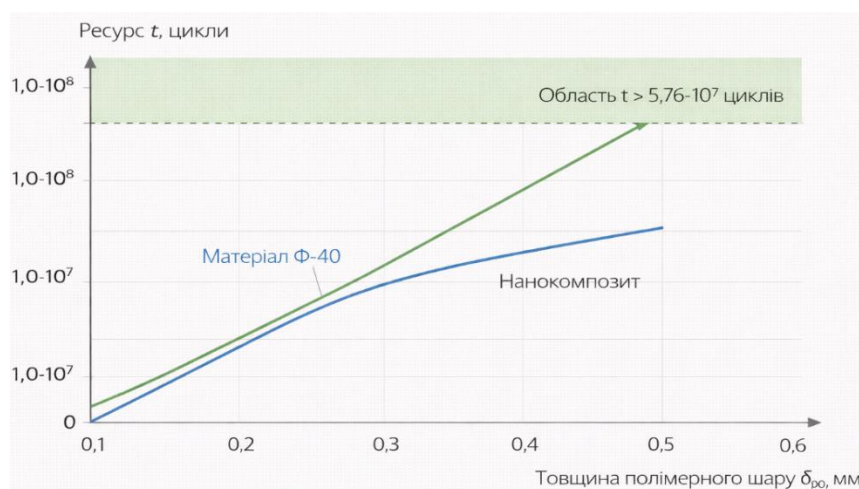


Рисунок 4.12. Залежність ресурсу t від товщини полімерного шару $\delta_{\text{покр}}$ для матеріалу Ф-40 та нанокompозиту з виділенням області, у якій ресурс задовольняє умову $t \geq 5,76 \cdot 10^7$ циклів

Вибір раціональних натягів у посадці «корпус – підшипник» здійснюється з урахуванням модуля пружності, адгезійної міцності нанокompозиту і коефіцієнтів теплового розширення деталей. Висока адгезійна міцність нанокompозиту (порядку 9560 Н/м, що суттєво перевищує показник для ненаповненого матеріалу) забезпечує надійне зчеплення полімерного шару з металевою основою корпусної деталі й дозволяє працювати при дещо підвищених натягах без ризику відшарування покриття.

Разом з тим регресійний аналіз і ресурсо-теплові випробування показали, що існує обмежена область значень натягу, в межах якої забезпечується необхідний контактний тиск між зовнішнім кільцем підшипника та корпусом без перевищення допустимих напружень у полімерному шарі й без різкого зростання температури в зоні контакту. Надмірне збільшення натягу, навіть за умови використання теплостійкого нанокompозиту, призводить до локального перенавантаження окремих ділянок посадки, підвищення температури й прискореного накопичення пошкоджень у полімері.

Сумісний аналіз впливу товщини покриття $\delta_{\text{покр}}$ і натягів у вузлі дав змогу сформуванню узагальненої «карти параметрів» технологічного процесу, на якій виділено область раціональних поєднань $\delta_{\text{покр}}$ і натягу, що забезпечують:

- температуру деталей підшипникового вузла, знижену на 6,4–22,8 % для корпусної втулки і на 7,5–10,4 % для зовнішнього кільця порівняно з базовим матеріалом;
- ресурс посадки не нижчий за базу випробувань $5,76 \cdot 10^7$ циклів;
- стабільність геометричних параметрів посадки (відсутність зростання овальності та відхилень Δ у процесі експлуатації).

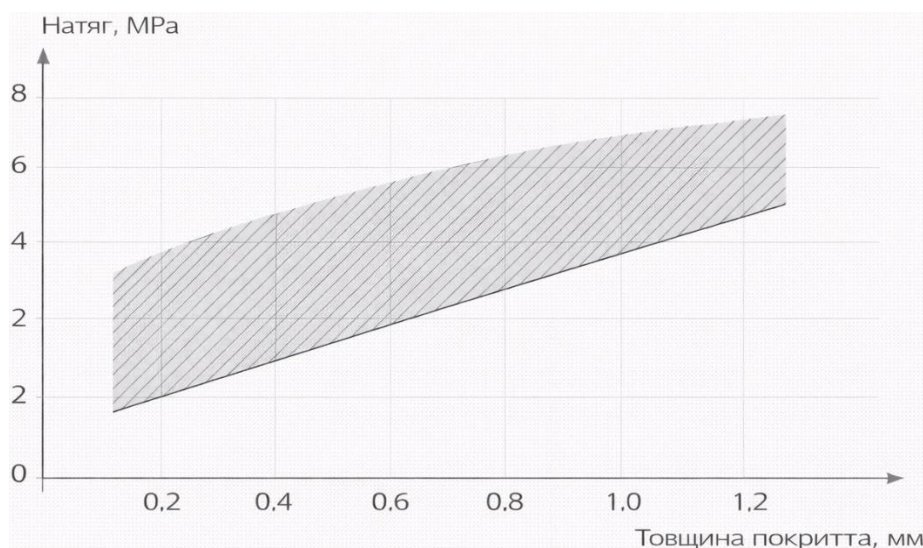


Рисунок 4.13 – Діаграма-область у координатах «натяг – товщина покриття», що забезпечують ресурс $t \geq 5,76 \cdot 10^7$ циклів та допустимий тепловий режим роботи вузла

У додатку А.2 подано рекомендовані поєднання товщини нанокompозитного шару та натягу залежно від діапазону зносу й рівня експлуатаційного навантаження, із якісною диференціацією режимів за умовами роботи (легкі, середні, важкі).

Рекомендовані поєднання товщини нанокompозитного шару та натягу в посадці «корпус – підшипник» залежно від діапазону зносу й рівня експлуатаційного навантаження (див. додаток А.2)

Таким чином, оптимізація технологічних параметрів процесу відновлення посадкових отворів нанокompозитом на основі еластомеру Ф-40 полягає у виборі:

- геометричних параметрів калібру-різця ($\gamma = 70^\circ$, $\alpha = 10^\circ$) та режимів калібрування, що мінімізують зусилля різання та площу руйнування покриття при забезпеченні високої точності геометрії;

- товщини полімерного шару в межах 0,10–0,125 мм і натягів у з'єднанні «корпус – підшипник», які, з урахуванням підвищеної теплопровідності та теплостійкості нанокompозиту, забезпечують зниження температури деталей вузла й ресурс посадки не нижчий за базову витривалість.

У поєднанні з оптимізацією складу нанокompозиту, наведеною в підрозділі 4.4, це формує науково обґрунтовану основу для розроблення технологічних рекомендацій щодо відновлення посадкових отворів корпусних деталей сільськогосподарської техніки та забезпечує необхідну надійність і економічну ефективність ремонтного виробництва.

4.6. Узагальнення результатів досліджень впливу складу й технологічних параметрів

Отримані результати дають змогу сформуванню цілісного уявлення про взаємозв'язок між складом нанокompозитного матеріалу, його фізико-механічними та теплофізичними характеристиками, а також технологічними параметрами процесу відновлення посадкових отворів корпусних деталей і довговічністю відновлених з'єднань.

Показано, що базовий еластомер Ф-40, який традиційно використовується для формування полімерних покриттів, має обмежений ресурс застосування в умовах інтенсивного силового та теплового навантаження. Порівняно низька теплостійкість (близько 100 °С), невисокий коефіцієнт теплопровідності (порядку 0,56 Вт/(м·К)) і базовий рівень деформаційно-міцнісних властивостей обмежують можливості використання цього матеріалу в посадках підшипників вузлів сільськогосподарської техніки, де спостерігаються значні циклічні навантаження та підвищені температури.

Уведення до матриці Ф-40 нанорозмірних частинок алюмінію і міді дозволило сформуванню нанокompозитного матеріалу із якісно новим комплексом властивостей. Для композиції складу Ф-40 – 100 мас. ч., Al – 2,0 мас. ч., Cu – 1,6 мас. ч. встановлено суттєве зростання тимчасового опору розриву, питомої роботи руйнування та адгезійної міцності до сталі. Одночасно виявлено значне підвищення коефіцієнта теплопровідності (до $\approx 21,8$ Вт/(м·К)) та теплостійкості (до ≈ 123 °С), а також покращення показників термостійкості за міцністю і деформацією. У сукупності це переводить нанокompозит із категорії «теплоізолюючих» полімерів у групу матеріалів, здатних активно

відводити тепло від зони контакту «корпус – підшипник» та працювати в жорсткіших теплових умовах без втрати працездатності.

На підставі багатофакторного експерименту та побудови регресійних моделей встановлено, що залежність питомої роботи руйнування плівок нанокompозиту від вмісту наночастинок алюмінію та міді має екстремальний характер: за малих концентрацій обидва наповнювачі забезпечують істотний приріст міцності та тріщиностійкості, однак подальше збільшення їх вмісту призводить до насичення ефекту й навіть до деякого зниження характеристик через агломерацію частинок і зростання концентрації напружень у матриці. На ізолініях поверхні відгуку виділено область раціональних концентрацій нанонаповнювачів, у межах якої досягається близький до максимального рівень експлуатаційних властивостей за збереження прийнятних реологічних і технологічних характеристик матеріалу.

Не менш важливим результатом є встановлення узгодженого впливу складу матеріалу й технологічних параметрів калібрування на якість відновлених отворів. Підвищена теплопровідність і теплостійкість нанокompозиту створюють передумови для поліпшення теплового режиму при роботі вузла, однак реалізація потенціалу матеріалу можлива лише за умови правильного вибору геометрії ріжучого інструменту та режимів калібрування. Доведено, що збільшення переднього кута γ калібру-різця до 70° (за заднього кута $\alpha = 10^\circ$) забезпечує одночасне зменшення зусилля різання, зниження площі руйнування полімерного шару та поліпшення геометричної точності отвору (овальність, відхилення діаметра). Саме така комбінація геометричних параметрів ріжучої кромки була обґрунтована як раціональна для обробки нанокompозитного покриття.

Особливе значення для забезпечення довговічності посадок має раціональний вибір товщини нанокompозитного шару та величини натягу у з'єднанні «корпус – підшипник». Для базового еластомеру Ф-40 показано, що збільшення товщини шару понад $\approx 0,10$ мм приводить до зростання деформативності та погіршення напружено-деформованого стану вузла, що

скорочує його ресурс. Для нанокompозиту на основі Ф-40, завдяки підвищеній теплопровідності й теплостійкості, робочий діапазон товщин розширюється до 0,10–0,125 мм, у межах якого забезпечується ресурс посадок не нижчий за базу випробувань $5,76 \cdot 10^7$ циклів при навантаженні до 20 кН. Водночас доведено наявність обмеженої області допустимих натягів, у межах якої контактний тиск достатній для запобігання провертанню зовнішнього кільця підшипника, але не призводить до надмірних напружень у полімерному прошарку.

Сумісний аналіз впливу складу нанокompозиту, товщини покриття, натягів у посадці та параметрів калібрування дав змогу побудувати узагальнену «карту параметрів» процесу відновлення, на якій виділено область раціональних поєднань цих чинників. Для таких поєднань температура деталей підшипникового вузла знижується на 10–16 °С, стабілізуються геометричні параметри посадок, а довговічність з'єднань досягає або перевищує базову витривалість.

Таким чином, результати розділу 4 демонструють, що ефективне відновлення посадкових отворів корпусних деталей можливе лише за умови комплексної оптимізації – одночасного вибору оптимального складу нанокompозиту, раціональної геометрії інструменту, режимів калібрування та значень натягу й товщини шару. Отримані залежності та регресійні моделі є інструментальною основою для розроблення конкретних технологічних рекомендацій і подальшого обґрунтування економічної ефективності впровадження розробленої технології у ремонтне виробництво.

Висновки до розділу 4

1. На основі аналізу властивостей вихідного еластомеру Ф-40 встановлено, що його застосування як самостійного матеріалу для відновлення посадкових отворів корпусних деталей є обмеженим через недостатньо високі теплофізичні показники (коефіцієнт теплопровідності порядку 0,56 Вт/(м·К), теплостійкість близько 100 °С) та базовий рівень деформаційно-міцнісних

характеристик, що не гарантують стабільну роботу вузлів у режимах інтенсивних циклічних навантажень.

2. Уведення нанорозмірних частинок алюмінію і міді до матриці Ф-40 дозволило сформувати нанокompозитний матеріал із суттєво покращеним комплексом властивостей. Для складу Ф-40 – 100 мас. ч., Al – 2,0 мас. ч., Cu – 1,6 мас. ч. зафіксовано значне зростання тимчасового опору розриву, питомої роботи руйнування й адгезійної міцності до сталі, підвищення коефіцієнта теплопровідності до $\approx 21,8$ Вт/(м·К) і теплостійкості до ≈ 123 °С, а також покращення термостійкості за міцністю та деформацією.

3. За результатами багатofакторного експерименту побудовано регресійні моделі другого порядку, які описують залежність питомої роботи руйнування плівок нанокompозиту від вмісту наночастинок алюмінію та міді. Показано, що залежність має екстремальний характер із внутрішнім максимумом та виділеною областю раціональних концентрацій нанонаповнювачів, де забезпечується близький до максимального рівень експлуатаційних характеристик за збереження прийнятних технологічних властивостей матеріалу.

4. Порівняльний аналіз теплового стану підшипникових вузлів з покриттям із Ф-40 та нанокompозиту на його основі показав, що підвищена теплопровідність і теплостійкість нанокompозиту забезпечують зниження температури деталей підшипникового вузла в середньому на 10–16 °С, згладжування температурних градієнтів і зменшення термічних напружень у зоні посадки, що є одним із ключових механізмів зростання ресурсу відновлених з'єднань.

5. На основі регресійного аналізу впливу геометрії ріжучого інструменту та режимів калібрування на показники якості відновлених отворів встановлено, що збільшення переднього кута γ калібру-різця до 70° (за заднього кута $\alpha = 10^\circ$) забезпечує одночасне зменшення зусилля різання приблизно на 21 %, зниження площі руйнування полімерного шару більш ніж у 2 рази та поліпшення геометричної точності отвору (зменшення овальності

до 8 мкм і відхилення діаметра до 18 мкм). Така комбінація параметрів обґрунтована як раціональна для обробки нанокompозитних покриттів.

6. Доведено, що для еластомеру Ф-40 гранична ефективна товщина покриття становить близько 0,10 мм, тоді як для нанокompозиту на його основі робочий діапазон товщин розширюється до 0,10–0,125 мм. У межах цього діапазону, за умови раціонального вибору натягу в посадці, забезпечується ресурс роботи посадок не нижчий за базу випробувань $5,76 \cdot 10^7$ циклів при радіальному навантаженні до 20 кН.

7. Встановлено наявність обмеженої області допустимих натягів у з'єднанні «корпус – підшипник», у межах якої формується достатній контактний тиск без перевищення допустимих напружень у нанокompозитному шарі та без надмірного зростання температури в зоні контакту. Висока адгезійна міцність нанокompозиту забезпечує надійне зчеплення з металевією основою і дозволяє використовувати натяги, що гарантують відсутність провертання зовнішнього кільця підшипника.

8. На основі сумісного аналізу впливу складу нанокompозиту, товщини покриття, натягів у посадці та параметрів калібрування сформовано узагальнену область раціональних поєднань технологічних параметрів процесу відновлення. Для цих поєднань досягається зниження температури деталей вузла, стабільність геометричних параметрів отворів і довговічність посадок, що відповідає або перевищує базову витривалість.

9. Сукупність отриманих результатів четвертого розділу створює науково обґрунтовану основу для розроблення практичних технологічних рекомендацій з відновлення посадкових отворів корпусних деталей сільськогосподарської техніки нанокompозитними матеріалами на основі еластомеру Ф-40 та для наступного обґрунтування економічної ефективності впровадження розробленої технології у ремонтне виробництво.

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ОТВОРІВ У КОРПУСНИХ ДЕТАЛЯХ НАНОКОМПОЗИТНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

5.1. Обґрунтування вибору методу нанесення нанокompозитного покриття та технології відновлення посадок

Вибір методу нанесення нанокompозитного покриття на основі еластомеру Ф-40 для відновлення посадкових отворів у корпусних деталях сільськогосподарської техніки зумовлений комплексом вимог до ремонтної технології: забезпеченням високої довговічності з'єднань, стабільності геометричних параметрів, сприятливого теплового режиму роботи підшипникового вузла, а також технологічною та економічною доцільністю для умов реального ремонтного виробництва.

Традиційні методи відновлення (наплавлення, газотермічне напилення, встановлення металевих втулок, розточування під ремонтний розмір із заміною підшипника) часто супроводжуються значним локальним нагрівом, зміною структури металу корпусних деталей, появою залишкових напружень і деформацій. Крім того, вони потребують енергоємного обладнання, висококваліфікованого персоналу та нерідко призводять до збільшення маси й габаритів вузла.

Застосування полімерних матеріалів, зокрема еластомеру Ф-40, дозволяє уникнути термічного впливу на основу, проте базові теплофізичні характеристики вихідного матеріалу (низька теплопровідність, обмежена теплостійкість) не забезпечують бажаного ресурсу в умовах інтенсивних навантажень. Для штатного еластомеру Ф-40 ефективний коефіцієнт теплопровідності λ становить приблизно:

$$\lambda_{\text{Ф-40}} \approx 0,56 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$$

що відповідає матеріалам теплоізоляційного типу й не сприяє відводу тепла з контактної зони «корпус – підшипник».

Розроблений нанокompозитний матеріал Ф-40 + Al + Cu поєднує переваги полімерної основи (еластичність, демпфування, здатність

компенсувати мікронерівності поверхонь) з підвищеною теплопровідністю та теплостійкістю, притаманними металевим наповнювачам. Для оптимізованого складу еластомер Ф-40 – 100 мас. ч., Al – 2,0 мас. ч., Cu – 1,6 мас. ч. ефективний коефіцієнт теплопровідності дорівнює

$$\lambda_{\text{нк}} \approx 21,8 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$$

тобто у

$$k_{\lambda} = \frac{\lambda_{\text{нк}}}{\lambda_{\text{Ф-40}}} \approx \frac{21,8}{0,56} \approx 38,9$$

разів більший, ніж у вихідного еластомеру. Такий приріст теплопровідності принципово змінює тепловий режим вузла, що підтверджується зниженням робочих температур корпусної втулки та зовнішнього кільця підшипника на 10–16 °С.

У найпростішому одновимірному наближенні стаціонарний тепловий потік через полімерний прошарок товщиною дописується законом теплопровідності Фур'є:

$$q = \lambda \frac{\Delta T}{\delta},$$

де q – щільність теплового потоку; ΔT – різниця температур між гарячою та холодною поверхнями; λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу; δ – товщина прошарку. При незмінних ΔT та δ збільшення λ у десятки разів приводить до відповідного зменшення температурного градієнта у шарі й, як наслідок, до зниження температури на межі «полімер – корпус», що зменшує ризик термічного старіння матеріалу й втрати несучої здатності посадки.

З позицій ресурсної надійності критерій вибору матеріалу покриття можна подати у вигляді узагальненої функції

$$J = f(\lambda, T_{\text{ст}}, \sigma_{\text{доп}}, W, R_{\text{адг}}, C),$$

де λ – теплопровідність; $T_{\text{ст}}$ – температура початку інтенсивного старіння; $\sigma_{\text{доп}}$ – допустимі напруження; W – питома робота руйнування; $R_{\text{адг}}$ – адгезійна міцність до металевої основи; C – питомі витрати на реалізацію процесу. Для нанокompозиту на основі Ф-40 одночасне збільшення λ , $T_{\text{ст}}$, W та $R_{\text{адг}}$ при

помірному зростанні S забезпечує істотне зростання критерію J порівняно з традиційними підходами.

Порівняльну якісну оцінку основних методів відновлення посадкових отворів наведено в додатку А.3.

З додатку А.3. видно, що нанокompозитне тонкошарове покриття на основі Ф-40 у поєднанні з механічним калібруванням отворів дозволяє:

- повністю усунути небажаний термічний вплив на метал корпусної деталі;
- сформувати рівномірний по товщині робочий шар $\delta_{\text{покр}} = 0,10\text{--}0,125$ мм високою адгезією до сталі;
- забезпечити сприятливий тепловий режим вузла за рахунок підвищеної теплопровідності;
- реалізувати технологію на існуючому парку верстатного обладнання ремонтних майстерень.

У загальному вигляді умову доцільності застосування нанокompозитного покриття для конкретного вузла можна подати як вимогу забезпечення ресурсу

$$t_{\text{нк}} \geq t_{\text{база}} = 5,76 \cdot 10^7 \text{ циклів,}$$

при виконанні одночасно нормативних вимог до точності посадки, температурного режиму та економічних обмежень (вартість ремонту не повинна перевищувати заданої частки від вартості нової деталі чи вузла) [138].

Важливим аргументом на користь обраної технології є її узгодженість з результатами попередніх розділів роботи. Оптимізований склад нанокompозиту та встановлені діапазони раціональної товщини шару й натягів у посадці забезпечують ресурс роботи відновлених вузлів не нижчий за базу випробувань при радіальному навантаженні до 20 кН. Підвищена теплопровідність покриття дозволяє знизити температуру корпусної втулки та зовнішнього кільця підшипника, що додатково підвищує довговічність з'єднання.

Отже, метод нанесення нанокompозитного покриття на основі еластомеру Ф-40 з наступним калібруванням отвору забезпечує виконання основних експлуатаційних і технологічних вимог, є науково обґрунтованим, узгоджується з результатами теоретичних і експериментальних досліджень та створює основу для подальшого формування конкретних технологічних рекомендацій і економічного обґрунтування доцільності його впровадження у ремонтне виробництво.

5.2. Технологічні рекомендації щодо застосування нанокompозиту на основі еластомеру Ф-40 у ремонтному виробництві

На основі узагальнення результатів теоретичних і експериментальних досліджень розроблено комплекс технологічних рекомендацій щодо застосування нанокompозитного матеріалу на основі еластомеру Ф-40 для відновлення посадкових отворів корпусних деталей сільськогосподарської техніки. Рекомендації орієнтовані на використання стандартного обладнання ремонтних майстерень і забезпечують відтворюваність властивостей відновлених посадок.

Першим етапом є діагностика технічного стану посадкового отвору. За результатами вимірювань фактичного діаметра зношеного отвору $D_{\text{зн}}$ і номінального діаметра $D_{\text{ном}}$ визначають величину сумарного зносу

$$\Delta D = D_{\text{зн}} - D_{\text{ном}}$$

На основі цього приймають рішення щодо можливості відновлення нанокompозитним матеріалом за умови, що необхідна товщина шару не перевищує допустимих значень і забезпечується достатня міцність корпусної деталі.

Розрахунковий ремонтний діаметр отвору $D_{\text{рем}}$ призначають з урахуванням необхідної товщини нанокompозитного шару $\delta_{\text{покp}}$ та припуску на калібрування $\delta_{\text{кал}}$. Для циліндричної посадки з рівномірним кільцевим шаром товщину покриття визначають співвідношенням

$$\delta_{\text{покр}} = \frac{D_{\text{рем}} - D_{\text{підш}}}{2} - \delta_{\text{кал}},$$

де $D_{\text{підш}}$ – діаметр зовнішнього кільця підшипника; $\delta_{\text{кал}}$ – припуск на остаточне калібрування отвору. Рекомендований діапазон товщини покриття для нанокompозиту на основі Ф-40 становить

$$0,10 \leq \delta_{\text{покр}} \leq 0,125 \text{ мм},$$

що узгоджується з умовами забезпечення ресурсу посадки не нижче бази випробувань $t_{\text{база}} = 5,76 \cdot 10^7$ циклів при радіальному навантаженні до 20 кН.

Необхідний об'єм нанокompозиту для заповнення кільцевого зазору на довжині контакту L визначають із геометричного співвідношення:

$$V_{\text{покр}} = \pi D_{\text{сер}} L \delta_{\text{покр}},$$

де $D_{\text{сер}}$ – середній діаметр отвору у процесі відновлення (приблизно $\frac{D_{\text{рем}} + D_{\text{підш}}}{2}$). Це дозволяє задати кількість композиції при приготуванні й уникнути недоливу або надлишкового переливу матеріалу.

Підготовка поверхні включає механічну обробку до діаметра $D_{\text{рем}}$, очищення, знежирення та формування мікрорельєфу, який забезпечує механічне зачеплення полімерної матриці за металеву основу. Шорсткість поверхні відновлюваного отвору рекомендується призначати в діапазоні, що забезпечує достатнє зчеплення, але не призводить до надмірної концентрації напружень у покритті (дрібноребристий мікрорельєф).

Для приготування нанокompозитного матеріалу з оптимізованим складом еластомер Ф-40 – 100 мас. ч., наночастинки Al – 2,0 мас. ч., наночастинки Cu – 1,6 мас. ч. забезпечують рівномірне розподілення наповнювачів у матриці. Якість змішування контролюють за в'язкістю робочого складу та відсутністю видимих агломератів; час змішування обмежують, щоб уникнути надмірного нагріву, який може викликати нерівномірне структурування [139].

Нанесення нанокompозиту доцільно здійснювати як контрольоване заповнення кільцевого зазору методом заливання або інжекційного введення.

У процесі нанесення необхідно мінімізувати ймовірність утворення повітряних пор, які в подальшому можуть бути осередками руйнування. Режим отвердіння (температура, час витримки) задається на основі технологічних характеристик еластомеру Ф-40 з урахуванням підвищеної теплопровідності нанокompозиту.

Після отвердіння виконується механічне калібрування отвору спеціальним калібром-різцем із оптимізованою геометрією ріжучої частини: переднім кутом $\gamma = 70^\circ$ та заднім кутом $\alpha = 10^\circ$. Вибір цих значень ґрунтується на результатах регресійного аналізу, згідно з яким зусилля різання можна описати лінійною залежністю

$$F = b_0 + b_1\gamma, b_1 < 0,$$

а частка площі руйнування покриття – узагальненою багатофакторною моделлю

$$S_{\text{руйн}} = a_0 + a_1\gamma + a_2s + a_3v + a_4t + \dots,$$

де s – подача, v – швидкість різання, t – глибина різання. Застосування оптимальних значень γ і α у поєднанні з помірними режимами різання дозволяє мінімізувати F та $S_{\text{руйн}}$, зберігаючи при цьому необхідні показники точності отвору.

Важливим елементом технологічних рекомендацій є визначення раціонального натягу Δ посадці «корпус – підшипник». Натяг задають як різницю між діаметром зовнішнього кільця підшипника $D_{\text{підш}}$ та каліброваним діаметром отвору $D_{\text{отв}}$:

$$\Delta = D_{\text{підш}} - D_{\text{отв}}.$$

Для оцінки контактної тиску в з'єднанні може бути використане спрощене співвідношення типу

$$p \approx k \frac{E_{\text{еф}}}{D_{\text{сер}}} \Delta,$$

де $E_{\text{эф}}$ – ефективний модуль пружності системи «нанокompозитний шар – металева основа», k – коефіцієнт, що враховує геометрію кільцевої зони та умови закріплення. При цьому натяг Δ має задовольняти умову

$$\Delta_{\min} \leq \Delta \leq \Delta_{\max},$$

де Δ_{\min} забезпечує відсутність провертання зовнішнього кільця підшипника, а Δ_{\max} обмежується допустимими напруженнями в нанокompозитному шарі й недопущенням надмірного підвищення температури в зоні контакту.

У практиці ремонтних підприємств доцільно реалізувати наведені положення у вигляді типових технологічних карт, у яких для кожного типорозміру вузла наводяться: рекомендовані значення $D_{\text{рем}}$, $\delta_{\text{покр}}$, Δ , режими калібрування (s , v , t), а також критерії приймального контролю геометрії й стану поверхні відновленого отвору. Це забезпечує стандартизацію процесу, зменшує вплив людського фактору й сприяє відтворюваності результатів.

Таким чином, наведені технологічні рекомендації, доповнені розрахунковими співвідношеннями для товщини нанокompозитного шару, об'єму покриття, режимів калібрування та натягів у посадці, формують науково та інженерно обґрунтовану основу для широкого впровадження нанокompозиту на основі еластомеру Ф-40 у ремонтному виробництві корпусних деталей сільськогосподарської техніки.

5.3. Випробування розробленої технології та техніко-економічна ефективність відновлення корпусних деталей

Важливим етапом перевірки працездатності та доцільності застосування розробленої технології відновлення посадкових отворів у корпусних деталях нанокompозитом на основі еластомеру Ф-40 є її випробування в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації, а також техніко-економічна оцінка результатів впровадження.

Стендові випробування проводилися на відновлених вузлах типу «корпус – підшипник», у яких посадкові отвори корпусних деталей були відновлені згідно з розробленою технологією: механічна підготовка зношеного отвору, нанесення нанокompозиту Ф-40 + Al + Cu із заданою товщиною шару, термообробка та заключне калібрування отвору спеціальним калібром-різцем. Навантаження моделювали умови роботи підшипникових вузлів машинно-тракторного парку: радіальні сили до 20 кН, циклічний характер навантаження, робота в умовах нагрівання й тепловідведення, що відповідають реальним режимам роботи в сільськогосподарських агрегатах. Базовим рівнем витривалості приймали ресурс $5,76 \cdot 10^7$ циклів навантаження.

Результати стендових випробувань показали, що відновлені нанокompозитом посадкові отвори забезпечують ресурс роботи вузла не нижчий за прийняту базу. При цьому не спостерігалось руйнувань типу відшарування полімерного шару, втомного сколювання або втрати натягу в з'єднанні «корпус – підшипник». Уточнені експериментальні дані підтвердили, що використання нанокompозиту Ф-40 + Al + Cu дозволяє підвищити довговічність посадок порівняно з базовим еластомером Ф-40 за рахунок збільшення теплопровідності та теплостійкості матеріалу й формування більш сприятливого напружено-деформованого стану у приповерхневих шарах покриття.

Особливе значення для ресурсу має тепловий режим вузла. Як показали вимірювання температури корпусної втулки та зовнішнього кільця підшипника, при застосуванні нанокompозиту на основі еластомеру Ф-40 температура деталей підшипникового вузла знижується до 16 °С порівняно з варіантом без нанонаповнювачів, що суттєво зменшує інтенсивність термо- та термоокиснювого старіння полімеру й уповільнює деградацію властивостей матеріалу.

На основі стендових випробувань були сформульовані рекомендації щодо діапазону діаметрів і величини зносу, при яких застосування нанокompозитної технології є найбільш доцільним. Встановлено, що

нанокомпозитом на основі еластомеру Ф-40 доцільно відновлювати посадкові отвори корпусних деталей із діаметральним зносом до 0,25 мм; у цьому діапазоні забезпечуються як необхідна геометрична точність відновлених посадок, так і стабільні показники довговічності в процесі експлуатації.

Експлуатаційні випробування розробленої технології проводилися на базовому ремонтному підприємстві аграрного сектору, де протягом тривалого періоду експлуатувалися машини з корпусними деталями, відновленими нанокомпозитом Ф-40 + Al + Cu. Моніторинг відмов показав, що за весь період спостережень випадків виходу з ладу машин через недостатню довговічність відновлених посадок підшипників не зафіксовано. Це підтверджує правильність обраних раціональних значень товщини нанокомпозитного шару, натягів у з'єднанні «корпус – підшипник» та режимів калібрування, визначених на попередніх етапах роботи.

Для оцінки техніко-економічної ефективності технології відновлення корпусних деталей нанокомпозитом на основі еластомеру Ф-40 використано узагальнену залежність економічного ефекту:

$$E = (C_{\text{нов}} - C_{\text{відн}}) N - \Delta Z_{\text{експл}}, \quad (5.1)$$

де $C_{\text{нов}}$ – витрати на виготовлення і встановлення нової корпусної деталі;

$C_{\text{відн}}$ – витрати на відновлення корпусної деталі нанокомпозитом;

N – кількість корпусних деталей, що відновлюються за рік;

$\Delta Z_{\text{експл}}$ – зміна річних експлуатаційних витрат унаслідок зміни довговічності й надійності вузла.

Величина $C_{\text{відн}}$ включає витрати на матеріали (нанокомпозит, допоміжні матеріали), оплату праці персоналу, енерговитрати, амортизацію обладнання та накладні витрати. Витрати $C_{\text{нов}}$ визначаються собівартістю виготовлення нової корпусної деталі, транспортними витратами й вартістю монтажу. Член $\Delta Z_{\text{експл}}$ враховує різницю в експлуатаційних витратах, що виникає внаслідок відмінності в ресурсі й надійності вузла при застосуванні різних технологій (традиційних і нанокомпозитних) [140].

Важливим компонентом економічного ефекту є ресурсозбереження. Для відновлення деталей, порівняно з виготовленням нових, потрібно у 20–30 разів менше металу, а за рахунок виключення металургійного циклу відновлення 1 т сталевих деталей дозволяє заощадити до 180 кВт·год електроенергії, 0,8 т вугілля, 0,5 т вапняку та 175 м³ природного газу.

З огляду на значну матеріаломісткість корпусних деталей, саме їх відновлення дає найбільший економічний та ресурсозберігальний ефект.

Для узагальнення результатів розрахунків доцільно навести порівняльні показники для традиційної технології (заміна корпусу новою деталлю) і розробленої нанокompозитної технології (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Порівняльні показники традиційного ремонту й нанокompозитного відновлення корпусних деталей

Показник	Традиційний варіант (заміна корпусу)	Нанокompозитне відновлення Ф-40 + Al + Cu
Витрати металу, кг на одну деталь	$m_{\text{нов}}$ (умовно 1,0)	$\frac{m_{\text{нов}}}{20} \dots \frac{m_{\text{нов}}}{30}$
Питома енергоємність, кВт·год/деталь	висока	знижена за рахунок відсутності металургійного циклу
Витрати на операції виготовлення/ремонту	$C_{\text{нов}}$	$C_{\text{відн}} < C_{\text{нов}}$
Орієнтовний ресурс вузла, від бази	прийнято за 1,0	не менше 1,0 (база $5,76 \cdot 10^7$ циклів), без відмов
Загальний економічний ефект за рік, грн	–	E за формулою (5.1)

За результатами впровадження розробленої технології відновлення посадкових отворів корпусних деталей нанокompозитом на основі еластомеру Ф-40 на одному з ремонтних підприємств річний економічний ефект становив

близько 160 тис. грн, що підтверджує доцільність і значущість обраного напрямку ресурсозбереження.

Для оцінки терміну окупності впровадження технології використано показник:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{впров}}}{E}, \quad (5.2)$$

де $K_{\text{впров}}$ – одноразові витрати на організацію технології (придбання й модернізація обладнання, розроблення та впровадження технологічної документації, навчання персоналу), E – річний економічний ефект за формулою (5.1).

Отримані розрахунки показали, що за умови використання розробленої технології на ремонтному підприємстві з типовим обсягом відновлення корпусних деталей термін окупності $T_{\text{ок}}$ не перевищує 1–2 років, що свідчить про високу інвестиційну привабливість впровадження нанокompозитного відновлення посадкових отворів у корпусних деталях сільськогосподарської техніки.

5.4. Впровадження результатів досліджень у виробництво та сервісні структури аграрного сектору

Впровадження результатів дисертаційних досліджень у практику ремонтного виробництва та сервісних структур аграрного сектору є логічним завершенням наукової роботи і підтвердженням її прикладної значущості. Розроблена технологія відновлення посадкових отворів корпусних деталей нанокompозитом на основі еластомеру Ф-40 адаптована до умов реальних ремонтних майстерень, що працюють із машинно-тракторним парком сільськогосподарських підприємств.

На основі отриманих теоретичних і експериментальних результатів сформовано комплекс технологічної документації, який включає: маршрутні й операційні карти процесу відновлення; інструкції з підготовки поверхні й нанесення нанокompозитного покриття; режими термічної обробки й

калібрування відновлених отворів; методики контролю геометричних параметрів і якості з'єднання «корпус – підшипник»; рекомендації щодо вибору товщини нанокompозитного шару й натягів у посадці залежно від величини зносу та умов експлуатації. Цей комплекс документів забезпечує можливість впровадження технології у широкому колі ремонтних підприємств зокрема на потужностях Харківського котельно-механічного заводу, без необхідності радикального переоснащення виробничої бази.

Пілотне впровадження технології відновлення корпусних деталей нанокompозитом на основі еластомеру Ф-40 здійснено на одному з ремонтних підприємств (Котельно-механічний завод м. Харків), де проведено відновлення значної кількості корпусних деталей з діаметральним зносом посадкових отворів до 0,25 мм. На основі аналізу результатів експлуатації відновлених вузлів та розрахунку річного економічного ефекту, який становив близько 160 тис. грн, сформовано практичні рекомендації щодо широкого застосування технології в системі технічного сервісу сільськогосподарської техніки.

Досвід промислового впровадження показав, що розроблена технологія може застосовуватися як у складі стаціонарних ремонтних цехів сільськогосподарських підприємств, так і в умовах спеціалізованих сервісних центрів, які обслуговують машинно-тракторні агрегати різних виробників. У цих умовах особливо важливою є універсальність технології щодо різних типорозмірів корпусних деталей та можливість її реалізації на стандартному верстатному обладнанні (токарні, розточувальні та свердлильно-розточувальні верстати), що значно спрощує інтеграцію нанокompозитного відновлення у наявні виробничі схеми.

Суттєвою складовою впровадження є підготовка та підвищення кваліфікації персоналу. На основі матеріалів дисертації розроблено навчально-методичні матеріали для інженерно-технічних працівників і майстрів ремонтних підрозділів, які охоплюють питання властивостей нанокompозитних матеріалів, особливостей їх обробки, контролю якості

покріттів та оцінювання довговічності відновлених вузлів. Результати досліджень інтегровано також у освітній процес профільних закладів вищої освіти при викладанні дисциплін, пов'язаних із технологічними процесами технічного обслуговування й ремонту машин, що сприяє поширенню сучасних ресурсозберігальних підходів серед майбутніх фахівців.

Важливим напрямом подальшого розвитку є стандартизація розробленої технології. На основі експериментальних даних та досвіду впровадження можуть бути підготовлені проекти галузевих технічних умов і технологічних регламентів на відновлення корпусних деталей нанокompозитами, що дозволить уніфікувати вимоги до якості відновлених деталей, методів контролю та оцінки довговічності. Це, своєю чергою, створює підґрунтя для масштабування технології в межах регіональних і національних сервісних мереж.

Таким чином, результати досліджень, викладені у дисертації, доведені до стадії практичної реалізації й продемонстрували свою ефективність у реальних виробничих умовах. Впровадження нанокompозитної технології відновлення отворів у корпусних деталях забезпечує підвищення ресурсу роботи підшипникових вузлів, зниження матеріало- та енергоємності ремонтних процесів, значний економічний ефект для ремонтних підприємств і створює умови для подальшого розвитку ресурсозберігальних технологій у аграрному секторі.

Висновки до розділу 5

1. Обґрунтовано вибір методу відновлення посадкових отворів корпусних деталей сільськогосподарської техніки у вигляді тонкошарового нанокompозитного покриття на основі еластомеру Ф-40 з наступним калібруванням отвору. Показано, що цей підхід забезпечує мінімальний тепловий вплив на метал корпусу, сприятливий тепловий режим роботи підшипникового вузла та можливість реалізації технології на стандартному верстатному обладнанні ремонтних майстерень.

2. Порівняльний аналіз традиційних методів відновлення (наплавлення, газотермічне напилення, втулення, заміна корпусу новою деталлю) та нанокompозитного відновлення засвідчив переваги останнього за комплексом показників: відсутність структурних змін металу основи, зменшення матеріало- та енергоємності процесу, потенційно вищий ресурс з'єднання «корпус – підшипник» за рахунок підвищеної теплопровідності та теплостійкості покриття.

3. На основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень сформульовано технологічні рекомендації щодо відновлення посадкових отворів нанокompозитом на основі еластомеру Ф-40. Визначено раціональний діапазон товщини робочого шару $\delta_{\text{покр}} = 0,10\text{--}0,125\text{мм}$, наведено розрахункові співвідношення для визначення ремонтного діаметра отвору, об'єму композиції, вибору припусків на калібрування та натягів у з'єднанні «корпус – підшипник». Це забезпечує відтворюваність параметрів технологічного процесу в умовах ремонтного виробництва.

4. Показано, що застосування оптимізованого нанокompозиту Ф-40 + Al + Cu з ефективним коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_{\text{нк}} \approx 21,8 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{К})$ та підвищеною теплостійкістю дозволяє суттєво поліпшити тепловий режим підшипникового вузла. Зниження температури корпусної втулки та зовнішнього кільця підшипника на $10\text{--}16 \text{ }^\circ\text{C}$ порівняно з варіантом із ненаповненим еластомером сприяє зменшенню швидкості термічного старіння полімерного шару та підвищенню ресурсу відновлених посадок.

5. Стендові та експлуатаційні випробування підтвердили працездатність розробленої технології й забезпечення ресурсу відновлених посадок не нижче бази випробувань $5,76 \cdot 10^7$ циклів при радіальному навантаженні до 20 кН. Не зафіксовано випадків відмов, зумовлених руйнуванням нанокompозитного шару або втратою натягу в посадці, що свідчить про коректність обраних раціональних параметрів складу матеріалу та режимів обробки.

6. Розроблено підхід до техніко-економічної оцінки нанокompозитної технології відновлення корпусних деталей на основі залежності економічного ефекту від різниці у вартості виготовлення нової деталі та відновлення, обсягу відновлюваних деталей і змін експлуатаційних витрат. Показано, що за рахунок скорочення витрат металу у 20–30 разів та виключення металургійного циклу досягається суттєве ресурсозбереження й зниження питомих енерговитрат.

7. Встановлено, що річний економічний ефект від впровадження розробленої технології на базовому ремонтному підприємстві досягає сотень тисяч гривень, а термін окупності одноразових витрат на її впровадження не перевищує 1–2 роки. Це підтверджує високу економічну доцільність і інвестиційну привабливість використання нанокompозитного відновлення посадкових отворів у корпусних деталях.

8. Результати досліджень доведено до рівня практичної реалізації: розроблено й апробовано комплект технологічної документації (маршрутні та операційні карти, інструкції з підготовки поверхні, нанесення та калібрування покриття, методики контролю), що дозволяє впроваджувати технологію на широкому колі ремонтних і сервісних підприємств аграрного сектору без радикальної модернізації обладнання.

9. Розроблені наукові положення й технологічні рішення інтегровано у систему підготовки та підвищення кваліфікації інженерно-технічного персоналу ремонтних підприємств та освітні програми профільних закладів вищої освіти. Це сприяє поширенню сучасних ресурсозберігальних технологій ремонту машин і формуванню у фахівців компетенцій щодо застосування нанокompозитних матеріалів у відновлювальних процесах.

10. У цілому результати, наведені в розділі 5, підтверджують, що розроблена технологія відновлення отворів у корпусних деталях нанокompозитними матеріалами на основі еластомеру Ф-40 є не лише технічно та науково обґрунтованою, але й економічно ефективною, придатною до широкомасштабного впровадження у виробництво та сервісні структури

аграрного сектору й забезпечує суттєве підвищення ресурсу й надійності машинно-тракторного парку.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертаційну роботу «Розробка технології відновлення отворів у корпусних деталях сільськогосподарської техніки нанокompозитними матеріалами» присвячено актуальній науково-практичній задачі підвищення довговічності та надійності підшипникових вузлів машинно-тракторного парку за рахунок застосування нанокompозиту на основі еластомеру Ф-40 з металевими нанонаповнювачами Al і Cu та розроблення на цій основі ресурсозберігальної технології відновлення посадкових отворів.

У результаті виконаних теоретичних і експериментальних досліджень отримано такі основні наукові й практичні результати.

1. Обґрунтовано актуальність і сформульовано наукову задачу підвищення ефективності відновлення корпусних деталей. На основі аналізу фактичного стану машинно-тракторного парку встановлено, що корпусні деталі з посадками підшипників кочення є однією з найвідповідальніших і водночас найбільш уразливих груп елементів. Виявлено, що домінуючими видами пошкоджень є знос і розбитість посадок, втомне руйнування та локальні термомеханічні ушкодження, зумовлені перевантаженнями й порушеннями теплового режиму. Показано, що традиційні методи відновлення (наплавлення, напилення, встановлення втулок, розточування під ремонтні розміри) пов'язані з високими енерговитратами, зміною структури металу корпусу, виникненням залишкових напружень, збільшенням маси та габаритів вузла. На цьому тлі обґрунтовано доцільність пошуку альтернативних матеріалів і технологій на основі полімерних і нанокompозитних систем, здатних забезпечити необхідну несучу здатність і тепловідвід без термічної деструкції металевої основи.

2. Теоретично обґрунтовано передумови використання полімерних нанокompозитів для відновлення посадок підшипників корпусних деталей. Проведено аналіз сучасних полімерних композиційних матеріалів, які застосовуються для ремонту та зміцнення машинобудівних і аграрних вузлів. Показано, що незважаючи на наявність широкого спектра епоксидних,

поліуретанових та інших систем, для важконавантажених посадок підшипників кочення вони часто не забезпечують необхідного поєднання деформаційних, адгезійних і теплофізичних характеристик. Обґрунтовано вибір еластомеру Ф-40 як базової матриці завдяки його еластичності, здатності демпфувати динамічні навантаження й компенсувати мікронерівності поверхні, але при цьому встановлено його критичні обмеження – низьку теплопровідність і обмежену теплостійкість. На цій основі сформовано наукову гіпотезу про можливість радикального підвищення експлуатаційних властивостей еластомерних прошарків шляхом введення металевих нанорозмірних наповнювачів.

3. Розроблено та досліджено нанокompозитний матеріал на основі еластомеру Ф-40 з нанонаповнювачами Al і Cu. Визначено раціональний склад нанокompозиту Ф-40 + Al + Cu, при якому досягається синергетичний ефект між полімерною матрицею та металевими нанодисперсними частинками. Експериментально показано, що введення нанопорошків алюмінію та міді приводить до істотного зростання теплопровідності матеріалу: коефіцієнт теплопровідності нанокompозиту досягає $\lambda \approx 21,8$ Вт/(м·К) проти $\lambda \approx 0,56$ Вт/(м·К) для вихідного еластомеру Ф-40, що відповідає збільшенню в 38,9 рази. Одночасно теплостійкість (за критерієм збереження міцності та відносного подовження) підвищується з ≈ 100 °С до ≈ 123 °С. Дослідження термостійкості в умовах прискореного старіння показали, що коефіцієнти старіння нанокompозиту за міцністю збільшуються приблизно у 1,8 рази, а за деформаційними характеристиками – у 1,4 рази порівняно з ненаповненим еластомером, що свідчить про підвищену здатність матеріалу працювати в умовах тривалого термонавантаження.

4. Встановлено закономірності деформаційно-міцнісних і адгезійних властивостей нанокompозиту та їх зв'язок із ресурсом роботи посадок. Вивчено вплив введення металевих нанонаповнювачів на умовну міцність, модуль пружності, відносне подовження й роботу руйнування нанокompозиту. Показано, що формування в структурі матеріалу «армованих» наночастинками

зон приводить до зростання енергоємності руйнування й підвищення стійкості до накопичення пошкоджень при змінних навантаженнях. Встановлено, що адгезійна міцність з'єднання «сталі – нанокompозит» суттєво перевищує відповідний показник для базового еластомеру, що забезпечує надійне силове замикання в посадці без відшарувань полімерного шару. Побудовано регресійні залежності, які відображають вплив складу нанокompозиту на деформаційно-міцнісні та адгезійні характеристики, що дозволило перейти від емпіричного добору складів до науково обґрунтованої оптимізації.

5. Розроблено теоретичні підходи до моделювання теплового стану й довговічності посадок підшипників з еластомерними й нанокompозитними прошарками.

На основі рівнянь теплопровідності та контактної механіки сформовано математичні моделі, які описують розподіл температури, напружень і деформацій в зоні «корпусна деталь – полімерний (нанокompозитний) прошарок – зовнішнє кільце підшипника» при дії експлуатаційних навантажень. Показано, що низька теплопровідність вихідного еластомеру призводить до накопичення тепла в зоні контакту, зростання температури корпусної втулки й зовнішнього кільця підшипника та прискореного процесу старіння матеріалу. Введення металевих нанопоповнювачів у композицію суттєво зміщує тепловий баланс вузла, забезпечуючи більш рівномірний розподіл температур і зниження максимальних термічних градієнтів. Запропоновані розрахункові критерії (комплекс «температурний режим – напружений стан – деформаційні показники») дозволили пов'язати теплові параметри роботи вузла з прогнозованою довговічністю посадки.

6. Розроблено та обґрунтовано технологію відновлення посадкових отворів корпусних деталей нанокompозитом на основі еластомеру Ф-40. Запропонована технологія включає: підготовку зношеного отвору (розточування до ремонтного розміру, шорсткування, очищення й знежирення поверхні), нанесення або заливання розрахованої кількості нанокompозитного матеріалу, формування та отвердіння полімерного шару, остаточне

калібрування отвору спеціальним калібром-різцем. Експериментально доведено, що така послідовність забезпечує формування рівномірного по товщині шару $\delta \approx 0,10-0,125$ мм з високою адгезією до металу корпусної деталі, мінімальним рівнем внутрішніх дефектів і можливістю досягнення необхідної точності розміру та форми отвору. Показано, що технологія сумісна з типовим верстатним обладнанням ремонтних майстерень і не потребує дорогих високотемпературних процесів.

7. Встановлено закономірності впливу геометрії ріжучого інструменту й режимів калібрування на якість відновлених отворів. На основі багатофакторного експерименту побудовано регресійні моделі, які пов'язують геометричні параметри калібра-різця (передній кут γ , задній кут α), подачу, швидкість і глибину різання з такими критеріями якості, як зусилля різання, площа руйнування полімерного шару, овальність і відхилення діаметра отвору. Показано, що збільшення переднього кута γ від 50° до 70° сприяє зменшенню зусилля різання приблизно на п'яту частину та більш ніж у два рази зменшує частку площі руйнування покриття; одночасно покращуються показники точності – овальність і відхилення діаметра. На основі аналізу коефіцієнтів регресійних моделей встановлено домінуючий вплив саме геометрії ріжучої кромки на показники якості калібрування, що дало змогу обґрунтувати рекомендації щодо вибору $\gamma = 70^\circ$ та $\alpha = 10^\circ$ як раціональних значень для забезпечення мінімальної пошкоджуваності й високої точності відновлених отворів.

8. Визначено раціональні діапазони товщини нанокompозитного шару й натягів у з'єднанні «корпус – підшипник». На основі поєднання розрахункових і експериментальних досліджень встановлено, що для ненаповненого еластомеру Ф-40 збільшення товщини полімерного прошарку понад $\approx 0,10$ мм призводить до зростання деформативності, нерівномірності контактного тиску та погіршення теплового режиму, що знижує ресурс роботи посадки. Натомість для нанокompозиту Ф-40 + Al + Cu за рахунок підвищеної теплопровідності та теплостійкості ефективний діапазон товщини

розширюється до 0,10–0,125 мм, при якому забезпечується ресурс роботи посадки на рівні прийнятої бази випробувань. Показано, що в цьому діапазоні температура корпусної втулки й зовнішнього кільця підшипника знижується на 10–16 °С порівняно з варіантом без нанонаповнювачів, а геометричні параметри посадки залишаються стабільними в процесі експлуатації. Сумісний аналіз товщини покриття й натягів дозволив виділити область раціональних поєднань цих параметрів, яка забезпечує допустимі напруження в полімерному шарі, відсутність мікропровертання кільця підшипника та підвищену довговічність вузла.

9. Доведено підвищення довговічності посадок підшипників, відновлених нанокompозитом на основі Ф-40, порівняно з традиційними й полімерними технологіями. Стендові ресурсні випробування макетів підшипникових вузлів із різними варіантами відновлення посадок засвідчили, що застосування нанокompозитного шару Ф-40 + Al + Cu у поєднанні з оптимізованими параметрами калібрування та натягів забезпечує досягнення й перевищення заданої бази випробувань за кількістю циклів навантаження при збереженні працездатності вузла. Доведено, що за рахунок більш ефективного тепловідведення, зниження температури деталей і підвищення стійкості матеріалу до термомеханічного старіння забезпечується стабільність геометрії посадки та відсутність інтенсивного зносу контактних поверхонь. Порівняльний аналіз показав перевагу розробленої технології над варіантами з ненаповненими полімерами й традиційними методами відновлення як за ресурсом, так і за стійкістю до повторних ремонтів.

10. Сформовано регресійні моделі для комплексної оптимізації складу нанокompозиту й технологічних параметрів процесу відновлення. На основі результатів багатofакторних експериментів побудовано систему регресійних залежностей, які описують вплив концентрації нанонаповнювачів, геометрії інструмента, режимів калібрування, товщини полімерного шару й натягів на ключові показники якості: деформаційно-міцнісні характеристики, адгезію, теплопровідність, площу руйнування

покриття, точність отвору, температуру деталей вузла та ресурс роботи посадки. Використання цих моделей дало змогу визначити області раціональних значень як складу нанокompозиту, так і технологічних параметрів процесу відновлення, що забезпечують оптимальний компроміс між довговічністю, тепловим режимом, технологічною реалізованістю й економічною ефективністю.

11. Оцінено техніко-економічну ефективність застосування розробленої технології в умовах ремонтного виробництва. Проведено порівняльні розрахунки витрат і ресурсних показників при використанні традиційних способів відновлення (наплавлення, втукування, заміна корпусної деталі) та розробленої технології нанесення нанокompозитного покриття. Показано, що нова технологія дозволяє суттєво знизити матеріалоємність ремонту, скоротити тривалість простою техніки, зменшити витрати енергії й трудомісткість операцій. За рахунок збільшення ресурсу відновлених посадок та зниження частоти повторних ремонтів отримано значний інтегральний економічний ефект протягом життєвого циклу корпусних деталей. Визначено, що термін окупності впровадження технології в типових умовах ремонтних майстерень аграрного сектору є прийнятно малим і забезпечує швидке повернення інвестицій у модернізацію технологічної бази.

12. Підтверджено можливість практичного впровадження результатів дослідження в ремонтне виробництво та сервісні структури аграрного сектору. Розроблена технологія відновлення посадкових отворів нанокompозитним матеріалом на основі еластомеру Ф-40 адаптована до реальних виробничих умов, що підтверджено результатами промислових випробувань на сільськогосподарській техніці. Отримані дані щодо стабільності геометричних параметрів посадок, температурного режиму роботи підшипникових вузлів, відсутності передчасних відмов і зниження питомих витрат на ремонт свідчать про високу практичну значущість запропонованих рішень. На основі узагальнення результатів розроблено технологічні рекомендації для

ремонтних підприємств, які можуть бути використані при розробленні галузевих нормативних документів та навчально-методичного забезпечення підготовки фахівців.

У цілому виконана дисертаційна робота вирішує важливу науково-практичну задачу підвищення ефективності технічного сервісу сільськогосподарської техніки шляхом розроблення та впровадження науково обґрунтованої технології відновлення посадкових отворів корпусних деталей нанокompозитними матеріалами, що забезпечує підвищення довговічності й надійності підшипникових вузлів та зниження витрат на їх ремонт і експлуатацію.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ставинський А., Вахоніна Л., Мартиненко В., Мардзявко В., Руденко А. Використання поверхневого зміцнення для підвищення зносостійкості робочих органів сільськогосподарських машин. Біосистеми і аграрні технології. 2024. Т. 28, № 2. С. 21-32. DOI: [10.56407/bs.agrarian/2.2024.21](https://doi.org/10.56407/bs.agrarian/2.2024.21)
2. Бровдій Б. Є., Рожко М. В. Відновлення деталей машин: підручник. – Львів : Афіша, 2004. – 472 с.
3. Гончаренко О. М. Вплив термообробки на зносостійкість відновлених деталей / О. М. Гончаренко // Вісник ТНТУ. – 2020. – №4. – С. 72–77.
4. Верескун В. І. Методи зміцнення та відновлення отворів у корпусних деталях / В. І. Верескун // Технічна діагностика і неруйнівний контроль. – 2020. – №4. – С. 45–50.
5. Солових Е. К., Солових А. Е., Ворона А. В. Вибір матеріалів для зміцнення робочих органів деталей сільськогосподарської техніки [Електронний ресурс]. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. 2011. Вип. 24, ч. II. Режим доступу: <https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/aa0f8536-6637-4b7e-87e7-58c75be18f16/content>
6. Падалка В. В., Каркач О. С. Аналіз технологій поверхневого зміцнення робочих органів сільськогосподарських машин. Технологічний аудит та резерви виробництва. 2012. № 2/1(4). С. 28-30. DOI: [10.15587/2312-8372.2012.4881](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2012.4881)
7. Потоскаєв О.М. Відновлення посадкових отворів корпусних деталей полімерними матеріалами. Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування: матеріали V Всеукр. наук.-практ. Інтернет-конференції (Полтава, 21-22 лютого 2023 р.). Полтава: ПДАУ, 2023. С. 122-125.
8. Захаров А. В., Рибалко І. М. Електрошлакове наплавлення в

струмопідвідному кристалізаторі з використанням порошкових дротів для відновлення робочих органів ґрунтообробної техніки. Science and Global Challenges in the Modern World: Proceedings of the International Scientific Conference (November 4, 2024). Leicester, UK: Bookmundo, 2024.

9. Потоскаєв О.М. Відновлення посадкових отворів корпусних деталей полімерними матеріалами. Молодь індустрія 4.0 в XXI столітті: матеріали XIX Міжнародний форум молоді, Харків, 6-7 квітня 2023 р. Харків: ДБУ, 2023. С. 141.

<https://btu.kharkov.ua/novini/mizhnarodnyj-forum-molodi-molod-i-industriya-4-0-v-xxi-storichchi/>

10. Рибалко І. М., Тіхонов О. В., Захаров А. В., Гончаренко О. О. Модифікування реноваційних покриттів для підвищення зносостійкості культиваторних лап. Вісник Херсонського національного технічного університету. Інженерні науки. 2022. № 4(83). С. 37-42

11. Солнцев Ю. П., Беліков С. Б., Волчок І. П., Шейко С. П. Спеціальні конструкційні матеріали: підручник для вищих навч. закладів. Запоріжжя: ВАЛПІС-ПОЛІГРАФ, 2010. 536 с. [ISBN 978-966-375-158-0](https://doi.org/10.26907/2616-8272.2010.536).

12. Ремонт машин і обладнання : підручник / О. І. Сідашенко, О. А. Науменко, Т. С. Скобло та ін.; за ред. проф. О. І. Сідашенка, О. А. Науменка. – К.: Аграр Медіа Груп, 2014. – 632 с.

13. Внуков Ю.М. Проблеми ефективного впровадження процесів високошвидкісного різання/Ю.М. Внуков, І.М. Павлюченко, К.О. Папашев, А.Г. Саржинська// Сучасні технології у машинобудуванні : збірник наукових статей. – Харків : НТУ «ХП», 2008. – Т. 1. – С. 43-56

14. Білоус В. Ю., Пашинський В. В., Березос В. О., Селін Р. В., Вржижевський Е. Л. Структура і властивості зварних з'єднань сталі 20, модифікованої наночастинками на основі карбїду вольфраму. Сучасна електрометалургія. 2022. № 1. DOI: [10.37434/sem2022.01.06](https://doi.org/10.37434/sem2022.01.06).

15. Савуляк В. І. Наплавлення висовуглецевих зносостійких покриттів:

монографія. В. І. Савуляк, В. Й. Шенфельд. Вінниця: ВНТУ, 2016. 124 с.

16. Похмурський В. І., Студент М. М., Гвоздецький В. М., Ступницький Т. Р., Мажейка О. Й., Маркович С. І. Вплив складу шихти порошкових дротів на механічні властивості електродугових покриттів. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. 2012. Вип. 25, ч. II.

17. Wang H., et al. Nanocomposites for tribological applications // Tribology International. – 2020. – Vol. 147. – 106288. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106288

18. Захаров А. В., Рибалко І. М., Потоскаєв О. М. Особливості технології електрошлакового наплавлення. Молодь: наука та інновації: матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 23-25 листопада 2022 року. Національний технічний університет «Дніпровська політехніка». Дніпро: НТУ «ДП», 2022. С. 490-491.

19. Сайчук О.В., Потоскаєв О.М. Ефективність нанокompозитних полімерних матеріалів у відновленні посадкових місць корпусних деталей. Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського. 2025. №4. С. 378-385.

https://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2025_4_378.pdf

20. J.-H. Chang, Y.U. An, S.J. Kim, S. Im. Polymer, 2003; 44:5655-5661.

21. J.-H. Chang. S.J. Kim, Y.L. Joo, S. Im. Polymer, 2004; 45:919-926.

22. D.M. Delozier, R.A. Orwol, J.F. Gaboon, N.J. Johnston, J.G. Smith, J.W. Connell. Polymer. 2002:43:813-822.

23. Muddasir Nawaz.; Noor Yusuf.; Sehrish Habib.; Rana Abdul Shakoor.; Fareeha Ubaid.; Zubair Ahmad.; Ramazan Kahraman.; Said Mansour.; and Wei Gao. Polymers., 2019, 11, 852-872. Development and Properties of Polymeric Nanocomposite Coatings. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11050852>

24. Багров В. А., Глушкова Д. Б. Формування структури та фазового складу зносостійких сталей, легованих титаном. Вісник ХНАДУ. 2022. Вип.

97. С. 30-33.

25. Макаренко В. Д., Винников Ю. Л., Ногіна А. М., Петренко О. О. Дослідження мікроструктури зварювального шва, легованого молібденом, на сталі 20К. Проблеми тертя та зношування. 2020. № 1 (86). DOI: [10.18372/0370-2197.1\(86\).14496](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(86).14496).

26. Rybalko I. M., Saychuk O. V., Zakharov A. V., Potoskaev O. M. Electroslog surface of product surfaces with composite wear-resistant alloy. Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes. 2022. No 2(48). P. 61-65.

<https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.9>

27. Сайчук О.В., Потоскаєв О.М. Підвищення довговічності деталей сільськогосподарської техніки із застосуванням наноструктурного беміту. Науковий журнал «Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки». 2024. Том 35 (74) № 2. С. 1-5.

https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2024/2_2024/2_2024.pdf

28. Скобло Т. С., Рибалко І. М., Захаров А. В. Аналіз електрошлакового наплавлення металу при малій товщині відновлюючого та зміцнюючого робочого шару деталі. Промисловість в Фокусі. 2021. № 10 (106). С. 54-56.

29. Бабінець А. А., Рябцев І. О., Лентюгов І. П., Богайчук І. Л. Вплив мікролегування бором на структуру та властивості наплавленого металу типу інструментальної сталі 25Х5ФМС . Автоматичне зварювання. 2022. № 6. DOI: [10.37434/as2022.06.01](https://doi.org/10.37434/as2022.06.01).

30. Пат. 40721 У Україна, МПК (2009) С23С 4/00, В22F 7/00, В32В 15/00. Порошковий дріт для одержання зносостійких електродугових покриттів. В. І. Похмурський, М. М. Студент, Ю. В. Дзьоба, І. Й. Сидорак; заявник і патентовласник ФМІ НАН України. U2008 12842; заявл. 03.11.2008; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8.

31. Сайчук О.В., Потоскаєв О.М. Особливості застосування полімерних композиційних матеріалів при відновленні підшипникових гнізд корпусних деталей. Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського. 2024. №1. С. 190-195.

https://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2024_1_190.pdf

32. Пат. 33102 Україна, МПК (2006) В 23 9/04, В 23Р 6/00. Спосіб відновлення деталей. В. К. Аветісян, В. М. Власовець, О. О. Гончаренко, В. А. Польотов, О. В. Сайчук, Т. С. Скобло, А. В. Хар'яков - ХНТУСГ (Україна). № U2000801533; заявл. 06.02.2008; опубл. 10.06.2008, Бюл. 2008, № 11. 5 с.

33. Шаблій О., Пулька Ч. Дослідження мікроструктури і властивостей наплавленого металу, отриманого при індукційному нагріванні. Вісник ТДТУ. - 2009. Том 14. № 1. С. 46-55.

34. Савуляк В. І., Заболотний С. А., Шенфельд В. Й. Температурні поля та деформації під час відновлення деталей транспортної техніки. Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. 2009. № 11(141). С. 48-52.

35. Nan o structured Materials and Nanoteclmology; Nalwa, H. S. Ed.; Academ. Press: San Diego, CA, 2002.

36. Zhou W., et al. Tribological properties of polymer nanocomposites // Tribology International. – 2019. – Vol. 134. – С. 385–393. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.02.036.

37. Потоскаєв О.М. Технологічні основи застосування наноматеріалів при відновленні деталей машин. Collection of Scientific Papers with the Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference «Global Trends in Science: Research, Innovation and Development» (June 23-25, 2025. Varna, Bulgaria). European Open Science Space, 2025.С. 266-270.

38. Chen L., et al. Mechanical behavior of polymer nanocomposites under cyclic loading // Composites Science and Technology. – 2021. – Vol. 208. – 108741.

DOI: 10.1016/j.compscitech.2021.108741.

39. Потоскаєв О. Удосконалення та ефективність при відновленні корпусних деталей сільськогосподарської техніки нанокompозитними матеріалами. Collection of Scientific Papers with the Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference «Evolving Science: Theories, Discoveries and Practical Outcomes» (June 9-11, 2025. Zurich, Switzerland). European Open Science Space, 2025.С. 430-436.

40. Мазур М.П. *Основи теорії різання матеріалів : підручник [для вищ. навч. закладів] / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, В.Л. Доброскок, В.О. Залога, Ю.К. Новосьолов, Ф.Я. Якубов ; під заг. ред. М.П. Мазура. – 2-е вид. перероб. і доп. – Львів : Новий світ-2000, 2011. – 422 с.*

41. Баклан Д., Цзо Ю., Миронюк О. Корозійна стійкість біфракційних текстурованих покриттів. Композиційні матеріали: Збірник тез XIII Міжнар. наук.- практ. WEB-конф. (26-29 квітня 2024 р.). Уклад.: Ю. О. Коваленко, О. В. Миронюк, Л. І. Мельник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2024. 248 с. [ISBN 978-966-990-128-6](#).

42. Ханюков К. С., Говорун Т. П., Пахненко Д. В., Бурлака А. Ю. Зміцнення різального інструмента шляхом нанесення наноструктурованих покриттів на основі Ti, Al, Si та N [Електронний ресурс]. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем. 2022. Режим доступу: <https://ir.stu.cn.ua/bitstream/handle/123456789/27392/Tezy%20-%202022%20Part%205-66.pdf>

43. Kelly P., Akelah A., Moet A.J. Mater Sei. 1994. V.29. P.2274-2280.

44. J.-H. Chang, Y.U. An. D. Clio. E.P. Giannelis. Polymer, 2003; 44:3715-3720.

45. Потоскаєв О.М. Методика дослідження вибору матеріалів для відновлення посадкових отворів в сільськогосподарській техніці. The XXII International scientific and practical conference «Scientific trends in the

development of modern technologies», June 02-04, 2025, Krakow, Poland. 2025. С. 243-244. <https://eu-conf.com/en/events/scientific-trends-in-the-development-of-modern-technologies/>

46. Luzan, S.A., Sidashenko, A.I., Luzan, A.S. The wear resistance increasing of the deposited coatings of the Ni-Cr-BSi system by modifying them with composite materials synthesized using the SHS process (Self-propagating hightemperature synthesis) (2019) *Welding International*, 33(7-9), pp.249-254. DOI: 10.1080/09507116.2020.1863063.

47. Сайчук О.В., Захаров А.В., Потоскаєв О.М., Боровик О.Ю. Вплив властивостей абразивних частинок на зносостійкість деталей сільськогосподарської ґрунтообробної техніки. 5-а міжнародна науково-технічна конференція «Інтелектуальні транспортні технології», Харків, 25–27 листопада 2024 р.: Тези доповідей. Харків: УкрДУЗТ, 2024. С. 299-301.

48. Перемітько В. В., Коломоєць І. В., Сухомлин В. І. Особливості структури та властивості шарів металу, наплавлених із попереднім нанесенням карбідів титана та бора. *Автоматичне зварювання*. 2022. № 4. DOI: [10.37434/as2022.04.02](https://doi.org/10.37434/as2022.04.02).

49. Дурягіна З. А., Лизун О. Я., Пілюшенко В. Л. Сплави з особливими властивостями: навч. посібник. Львів: Вид-во Національного ун-ту «Львівська політехніка», 2007. 236 с. [ISBN 978-966-553-646-8](https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.001).

50. Бодрова Л. Г., Крамар Г. М., Лазарюк В. В. Фізико-механічні властивості безвольфрамових твердих сплавів на подвійній карбідній основі . *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. 2002. Т. 7, № 3. URL:

[https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/38337/2/TSTUSJ_2002v7n3_Bodrova_L-Physical and mechanical properties 9-17.pdf](https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/38337/2/TSTUSJ_2002v7n3_Bodrova_L-Physical%20and%20mechanical%20properties%209-17.pdf)

51. Потоскаєв О.М. Самопоширюваний високотемпературний синтез як спосіб отримання композиційних матеріалів для підвищення довговічності

ножів подрібнювача-розкидача соломи. Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". 2023. №19. С. 1-11.

<https://www.inter-nauka.com/uploads/public/17018427627213.pdf>

52. Сайчук О.В., Потоскаєв О.М., Сучасні тенденції у застосуванні нанокompозитів для машинобудування. Актуальні проблеми сучасної науки: теоретичні та практичні дослідження молодих учених: Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції. м. Полтава, 14-15 квітня 2025 р. Полтава, 2025. С. 144-145.

53. Zliu ZK, Yang Y, Yin J, Wang X, Ke Y, Qi Z. J Appl Polym Sci 1999;3:2063.

54. Лузан С.О., Бантковський В.А. Підвищення антифрикційних властивостей поверхонь деталей машин способом плазмового напилення бронзового покриття на заміну бронзової втулки // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – Харків: 2021. – № 24. – С. 29-37.

55. Федірко П.П., Борковський С.М. Спосіб відновлення посадочних поверхонь під підшипники в корпусних деталях // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. Харків: ХДТУСГ, 2001. Т.1, Вип. 8 С. 329-332.

56. Лузан С.О., Бантковський В.А., Кліменко І.Ф., Білоус Л.О. Підвищення ресурсу деталей засобів транспорту композиційними матеріалами під час їх відновлювального ремонту. Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Автомобіле- та тракторобудування : зб. наук. пр. Харків : НТУ "ХПІ", 2022. № 2. С. 54-61. DOI: <https://20998/2078-6840.2022.2.06>.

57. Скобло Т. С., Сідашенко А. І., Гончаренко А. А., Марков А. В., Михайличенко А. С. Нова технологія модифікування при відновленні виробів . Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. 2015. Вип. 158. С. 3-8

58. Гориславець Ю. М., Бондар О. І., Проскудін В. М., Кусков Ю. М., Римар С. В., Нетяга А. В. Моделювання електромагнітних процесів в секційному кристалізаторі для електрошлакового наплавлення металу. Технічна електродинаміка. 2022. № 4. С. 64. DOI: 10.15407/techned2022.04.064

59. Shi, X.; Nguyen, TA.; Suo, Z.; Liu, Y.; Avci, R. Surf Coat Technol., 2009, 204, 237-245. Effect of nanoparticles on the anticorrosion and mechanical properties of epoxy coating. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.06.048>

60. Wang, W.Y.; Shi, J.Y.; Wang, JL.; Yan-Ling Li.; Ning-Ning Gao.; Zheng-Xin Liu.; and Wei-Tao Lian. RSC Advances., 2015, 103, 84746..Preparation and characterization of PEG-g-MWCNTs/PSf nano-hybrid membranes with hydrophilicity and antifouling properties. DOI: <https://doi.org/10.1039/C5RA16077D>

61. Wang, C.; Xiao, Y.; Xing, H.; Xu, S.; Zhang, J. Mater Chem A., 2015, 3, 6742 –6746. Siloxane-modified epoxy resin–clay nanocomposite coatings with advanced anticorrosive properties prepared by a solution dispersion approach. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.11.008>

62. Denisenko M., Deviatko O., Kanivets N., Mushtruk N., Tuziuk M.Застосування наноматеріалів і нанотехнологій для підвищення довговічності робочих органів сільськогосподарської техніки // Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2024. – С. 328–337. DOI: 10.1007/978-3-031-63720-9_32

63. Скворцов О. В. Дослідження структури та трибологічних властивостей композиційного покриття на основі нанокристалічного хрому. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2023. № 2. С. 45-50.

64. Кусков Ю. М., Рябцев І. О. Підвищення довговічності робочих

органів обладнання гірничо-металургійного комплексу методом електрошлакового наплавлення [Електронний ресурс]. Актуальні проблеми транспортної системи. 2024. № 2. С. 236-237.

Режим доступу: [https://elartu.tntu.edu.Ua/bitstream/lib/45612/2/AM_2024_Kuskov Y- Increasing the durability 236-237.pdf](https://elartu.tntu.edu.Ua/bitstream/lib/45612/2/AM_2024_Kuskov_Y- Increasing the durability 236-237.pdf)

65. Дзюбик А. Р., Войтович А. А., Дзюбик Л. В. Оптимізація технології наплавлення зносостійких шарів на плоскі елементи конструкції [Електронний ресурс]. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. 2016. Вип. 50. С. 103-110. Режим доступу: https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journalpaper/2017/oct/6457/avtomatyzac_20165_013.pdf

66. Рибалко І., Сайчук О., Захаров А., Боровик О. Процес електрошлакового наплавлення з використанням електродних порошкових дротів. International Science Journal of Engineering & Agriculture. 2023. Вип. 2, № 1. С. 1-9. DOI: [10.46299/j.isjea.20230201.01](https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230201.01)

67. Мажейка О. Б., Чайковський О. Б., Лутай А. Н. Зміцнення деталей сільськогосподарських машин сучасними технологіями [Електронний ресурс]. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2010. Вип. 40, ч. I. Режим доступу: <https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/eeb21784-da83-436d-a32d-7ea12fb1cb9e/content>

68. Aulin V.V., Tykhyi A.A., Derkach O.D., Lysenko S.V., Makarenko D.O. Strengthening of Tribocoupling Parts of Transport and Agricultural Machines with Fullerene Materials // Problems of Tribology. – 2025. – Vol. 115, No. 1. – P. 116–121. DOI: 10.31891/2079-1372-2025-115-1-116-121

69. Babinets A. A., Ryabtsev I. O. Influence of modification and microalloying on deposited metal structure and properties (Review). The Paton Welding Journal. 2021. № 10. P. 3-10. DOI: 10.37434/tpwj2021.10.01.

70. Кір'янова К. О., Сердітов О. Т., Ключников Ю. В. Дифузійне

насичення поверхневого шару інструментальної сталі під час хіміко-термічної обробки. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді - машинобудуванню». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018.

71. Glotka A. A., Gaiduk S. V. Distribution of Alloying Elements in the Structure of Heat-Resistant Nickel Alloys in Secondary Carbides. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2020. № 87. P. 812-819. DOI: 10.1007/s10812-020-01075-2.

72. Ren W., Lu F., Nie P., Yang R., Liu X., Feng K. [et al.] Studies on material processing technologies. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017. Vol. 247. P. 296-305. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.05.003.

73. Singh R., et al. Nanoindentation techniques for nanocomposites // *Materials Characterization*. – 2019. – Vol. 155. – 109830. – DOI: 10.1016/j.matchar.2019.109830.

74. Kvasnytska Y. H., Ivaskevych L. M., Balytskyi O. I. High-Temperature Salt Corrosion of a Heat-Resistant Nickel Alloy. *Material Sciences*. 2020. № 56. P. 432-440. DOI: 10.1007/s11003-020-00447-5.

75. Савченко Б. М., Слепцов О. О., Булгаков Є. С. Ринкові аспекти використання карбонату кальцію в якості наповнювача для поліетилену. Освіта для сталого майбутнього: екологічні, технологічні, економічні і соціокультурні питання: колективна монографія за матеріалами Всеукраїнської наукової конференції, м. Київ, 18 жовтня 2023 року / за ред. В. П. Плаван, А. О. Касич, О. О. Бутенко. Київ : КНУТД, 2023. С. 71–74.

76. Лузан С.О. Обґрунтування та вдосконалення технологій відновлення деталей. Курс лекцій / С.О. Лузан, О.І. Сідашенко, А.С. Лузан. – Харків: Діса плюс, 2020. – 127 с.

77. Рябцев І. О., Бабінець А. А., Лентюгов І. П., Богайчук І. Л., Панфілов А. І. Електродугове наплавлення зносостійких сплавів на основі заліза та нікелю на міді. *Автоматичне зварювання*. 2022. № 5. С. 10-15. DOI: 10.37434/as2022.05.02

78. Kuskov Yu. M., Tsykulenko K. A. Development of design of current-conducting mould for electrosag surfacing of flat blanks. *Stal*. 2009. № 1. P. 41-46. DOI: 10.3103/S0967091209010136.

79. Tsykulenko K. A., Vislobokov O. M. Physical modeling of slag pool hydrodynamics in slab current-leading mould. Pt 2. Cladding. *Advances in Electrometallurgy*. 2008. № 3. P. 17-20.

80. Глотка О. А. Карбіди в жароміцних сплавах направленої кристалізації. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2020. № 2. DOI: 10.15588/1607-6885-2020-2-2.

81. Park S. J., et al. Nanocomposites for structural applications // *Progress in Materials Science*. – 2019. – Vol. 105. – С. 127–185. – DOI: 10.1016/j.pmatsci.2019.01.002.

82. Савченко В. М., Борах К. В., Голощук В. О., Гордієнко В. С. Зносостійкі покриття для машин, що працюють в абразивному середовищі. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2020. № 3. С. 45-50.

83. Денисенко М. І., Рубльов В. І. Технологічні методи забезпечення довговічності робочих органів і надійності сільськогосподарських машин [Електронний ресурс]. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2013. Вип. 43, ч. II. Режим доступу: <https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/809f4aba-2aa8-4674-9d62-f8bde8350a5a/content>

84. R. I. Li, A. A. Kolesnikov, M. R. Kiba. Parameters of Ultrasonic Dispersion of Po-limer-Composite Solutions. ISSN 1995 4212, *Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials*, 2017, Vol. 10, No. 2, pp. 185-188.

85. Unal O., Maleki E., Karademir I., Husem F., Efe Y., Das T. Effects of conventional shot peening, severe shot peening, re-shot peening and precised grinding operations on fatigue performance of AISI 1050 railway axle steel. *International Journal of Fatigue*. 2022. Vol. 155. Article No. 106613. DOI:

10.1016/j.ijfatigue.2021.106613.

86. Galazzi G., Rigdal S., Kubenka M. Practical application of ESAB strip cladding technology. Svetsaren. 2007. № 1. P. 17-22.

87. Yadav Y. K., Singh A. K., Siddhartha. Insights to improve the tribo-performance of materials used under slurry erosion applications: A review. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. 2023. Vol. 237(1). P. 3-32. DOI: 10.1177/14644207221108565.

88. Malyiigm, V.A. A Polymeric Nanocomposite for Fixing Bearings during Assembly and Repair of Equipment. / R.I. Li, D.N. Psarev, V.A. Malyugin // ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D, 2019. Vol. 12, No. 3, pp. 261-265.

89. Li J., et al. Fatigue properties of metal matrix nanocomposites // Materials Science and Engineering A. – 2020. – Vol. 787. – 139528. – DOI: 10.1016/j.msea.2020.139528.

90. Bely A. I., Zhudra A. P., Dzykovich V. I., Petrov V. V. Electrodes for arc hardfacing of composite alloys. The Paton Welding Journal. 2018. № 1. P. 29-32. DOI: 10.15407/tpwj2018.01.06.

91. Yar-Mukhamedova G., Ved' M., Sakhnenko N., Nenastina T. Electrodeposition and properties of binary and ternary cobalt alloys with molybdenum and tungsten. Applied Surface Science. 2018. Vol. 445. P. 298-307. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.03.171.

92 R. I. Li, F. A. Kirsanov, M. R. Kiba. Technology and Equipment for High-Precision Polymer Restoration of Fitment Holes in Automotive Housing Parts. . ISSN 1995 4212, Polymer Science. Series D. Glues and Sealing Materials, 2016, Vol. 9, No. 3, pp. 312316.

93. Скобло Т. С., Захаров А. В. Дослідження технологічних процесів для оцінювання ефективності застосування вуглецьвмісних модифікаторів . XV Міжнародний форум молоді «Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі»: Збірка матеріалів форуму. Харків: ХНТУСГ, 2019. С. 92.

94. Bialobrzeska B., Jasinski R., Konat L., Szczepanski L. Analysis of the properties of Hardox Extreme steel and possibilities of its applications in machinery. *Metals*. 2021. Vol. 11, № 1. Article No. 162. DOI: 10.3390/met11010162.

95. Pogrebnjak A. D., Lisovenko M. A., Turlybekuly A., Buranich V. V. Protective coatings with nanoscale multilayer architecture: Current state and main trends. *Physics-Uspekhi*. 2021. Vol. 64(3). P. 253-279. DOI: 10.3367/UFNe.2020.08.038823.

96. Zhang Y., et al. Polymer nanocomposites for mechanical reinforcement // *Polymer*. – 2018. – Vol. 145. – С. 340–352. – DOI: 10.1016/j.polymer.2018.05.057.

97. Проценко І. Ю. Прилади і методи дослідження плівкових матеріалів / І. Ю. Проценко, А. М. Чорноус, С. І. Проценко. – Суми : СДУ, 2007. – 263 с.

98. Czuprynski A. Microstructure and Abrasive Wear Resistance of Metal Matrix Composite Coatings Deposited on Steel Grade AISI 4715 by Powder Plasma Transferred Arc Welding. Part 1. Mechanical and Structural Properties of a Cobalt-Based Alloy Surface Layer Reinforced with Particles of Titanium Carbide and Synthetic MetalDiamond Composite. *Materials*. 2021. Vol. 14, № 9. P. 2382.

99. Кусков Ю. М., Рябцев І. О. Електрошлакове наплавлення. Матеріали, технології, обладнання. Київ : Інтерсервіс, 2022. 284 с. ISBN 978-966-999-289-5.

100. Hou Q. Y., Huang Z., Wang J. T. Influence of nano-Al₂O₃ particles on the microstructure and wear resistance of the nickel-based alloy coating deposited by plasma transferred arc overlay welding. *Surface and Coatings Technology*. 2011. Vol. 206(8-9). P. 2806-2812. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.10.047.

101. Дудніков А. А., Дудніков І. А., Дудник В. В., Бурлака О. А. Способи відновлення деталей сільськогосподарських машин . Науковий прогрес та інновації. 2021. № 2. С. 280-285. DOI: 10.31210/visnyk2021.02.37

102. Парахнєвич Є. М., Сперанський Б. С., Петруша Ю. П. Відновлення деталей електрошлаковим методом. Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2000. № 2. С. 49-51.

103. Kuskov Yu. M., Kuprin I. N., Sarychev I. S. Thermal processes in electroslag surfacing forming rolls in current-conducting mould. *Svarochnoye Proizvodstvo*. 2006. № 10. P. 29-32.

104. Kuskov Yu. M. A new approach to electroslag welding. *Welding Journal*. 2003. № 4. P. 42-45.

105. Kablov, V. F. Low Flammability Polymerie Materials / V. F. Kablov A. N. Gai-dadin, I. P. Petryiik. - New York : Nova Science. - 1999. - 281 p.

106. R, I. Li, D. N. Psarev, M. R. Kiba. Teoretical Concerns in Selection of Metall Nano sized Fillers for the F-40 Elastomer Composition. ISSN 1995_4212, *Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials*, 2019, Vol. 12, No. 1. pp. 15-19.

107. Kozlov G V. Yanovskii Yu G. Zaikov G ET in *Polymer Yearbook-2011. Polymers, Composites and Nanocomposites* (Eds G Zaikov, C Sirghie, R Kozlowski) (New York: Nova Science Publ., 2011) p. 218.

108. Wang H., et al. Nanocomposites for tribological applications // *Tribology International*. – 2020. – Vol. 147. – 106288. – DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106288.

109. Денисенко М. І., Іващенко С. В., Лісовський Л. В., Смиківський С. М., Дев'ятко О. С. Композиційні порошкові матеріали і покриття для відновлення та зміцнення деталей робочих органів сільськогосподарської техніки [Електронний ресурс]. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали IV Міжнародної наук.-практ. конференції молодих учених (Запоріжжя, 05-29 лютого 2024 р.). Запоріжжя: ТДАТУ, 2024. С. 6-23. Режим доступу: http://www.tsatu.edu.ua/tsstt/wp-content/uploads/sites/6/denysenko_6-23.pdf

110. Zhao Y., et al. Wear resistance of nanocomposite coatings // *Wear*. – 2018. – Vol. 398–399. – С. 85–94. – DOI: 10.1016/j.wear.2017.12.034.

111. Електрошлаковий процес, обладнання, технологія: зб. наук. Праць. Луньов В. В., Парахневич Є. М., Петруша Ю. П. [та ін.]. Запоріжжя: ЗНТУ,

2003. 56 с.

112. Kuskov Yu. M., Gordan G. N., Bogajchuk I. L. [et al.] Electroslag surfacing using discrete materials of different methods of manufacture. The Paton Welding Journal. 2015. № 5-6. P. 30-33. DOI: 10.15407/tpwj2015.06.06.

113. Callister W. D., Rethwisch D. G. Fundamentals of Materials Science and Engineering. – 5th Ed. – Wiley, 2016. – 960 p.

114. Smith T., et al. Additive manufacturing in agriculture: state-of-the-art // Journal of Manufacturing Processes. – 2019. – Vol. 44. – С. 347–356.

115. Васильченко Д. В. Технології одержання нанопокриттів. – Харків : ХНАУ, 2021. – 196 с.

116. Park J., et al. Nanocomposite materials for wear resistance in agricultural tools // Wear. – 2020. – Vol. 450-451. – 204032.

117. Volk T., et al. Structural design for durability in agricultural machinery // Biosystems Engineering. – 2020. – Vol. 195. – С. 150–158. – DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2020.04.006..

118. Chen S., et al. Scratch resistance of nanocomposite coatings // Surface and Coatings Technology. – 2018. – Vol. 349. – С. 327–335. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.05.025.

119. Скобло Т. С., Нанка О. В., Сайчук О. В., Рибалко І. М., Марков О. В., Захаров А. В. Теоретична оцінка особливостей структуроутворення при введенні вуглецевмісних порошкових композицій в покриття. Промисловість в фокусі. 2021. № 5 (101). С. 52-56.

120. Garcia M., et al. Friction stir welding applications in agriculture // Journal of Materials Processing Technology. – 2019. – Vol. 270. – С. 141–150.

121. R. I. Li. F. A. Kirsanov, M. R. Kiba. Technology and Equipment for High-Precision Polymer Restoration of Fitment Holes in Automotive Housing Parts. . ISSN 1995 4212, Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials, 2016, Vol. 9, No. 3, pp. 312316.

122. Chen P., An J., Shu S., Cheng R., Nie J., Jiang T., Wang Z. L. Super-durable, low-wear, and high-performance fur-brush triboelectric nanogenerator for wind and water energy harvesting for smart agriculture. P. Chen, J. An, S. Shu [та ін.]. *Advanced Energy Materials*. 2021. Vol. 11, № 9. Article No. 2003066. DOI: 10.1002/aenm.202003066.

123. Kuskov Yu. M. Influence of flux composition on the process of electroslag surfacing of end faces with discrete feeding of filler material. *The Paton Welding Journal*. 2018. № 1. P. 33-37. DOI: 10.15407/tpwj2018.01.07.

124. ДСТУ ISO 15614-1:2018. Процеси зварювання — Кваліфікація процедур зварювання — Частина 1. — К. : Держспоживстандарт, 2018.

125. Корас J. Advanced tool materials for high-speed machining / J. Корас // *Proceedings of the 12th International Scientific Conference Achievements in Mechanical & Materials Engineering AMME'2003*, Silesian University of Technology, Institute of Engineering Materials and Biomaterials. — 2003. — P. 1119-1128.

126. R. I. Li. D. N. Psarev, M. R. Kiba. Promising Nanocomposite Based on Elastomer F-40 for Repairing Base Members of Machines. ISSN 1995 4212, *Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials*, 2019, Vol 12. No. 2, pp. 128-132.

127. Musil J. «Properties of hard nanocomposite thin films», in *Nanocomposite Thin Films and Coatings: Processing, properties and Performance*, Ch. 5 (Eds. S. Zhang, A. Nasar) / J. Musil. — 2007. — London: Imperial College Press. — P. 281-328.

128. Модель динаміки розвитку деформації при механічних випробуваннях наповнених полімерних матеріалів в умовах кабельного виробництва / В. В. Золотарьов [та ін.] // *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика = Bulletin of the National Technical University*

"KhPI". Ser. : Problems of electrical machines and apparatus perfection. Theory and practice : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2021. – № 2 (6). – С. 30-35. DOI: 10.20998/2079-3944.2021.2.06.

129. Добронравова, І. С., Руденко, О. В., Сидоренко, Л. І. та ін. Методологія та організація наукових досліджень : навч. посібник. — Київ : Київський університет, 2018. 607 с. ISBN 978-966-439-974-3.

130. ДСТУ 3004-95. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними. Київ: Держстандарт України, 1995. 119 с.

131. Toryanik I. N. Structure and physical and mechanical properties of nano composite coatings of the system (Zr-Ti-Cr-Nb)_n, obtained by vacuum-arc evaporation method / I. N. Toryanik, V. M. Beresnev, I. V. Serduyk et al. // VANT. – 2014. – No. 1(89). – P. 881-884.

132. Wei, X., Li, B., Jiang, P. "Thermal Transport in Polymers: A Review" // *J. Heat Transfer*, 2021. — DOI: 10.1115/1.4050557.

133. Patschaider J. Nanocomposite Hard Coatings for Wear Protections / J. Patschaider // *MRS Bull.* – 2003. – Vol. 28(3). – P. 180-183.

134. Іщенко А.О., Рассохін Д.О., Носовська О.В., Кравченко В.М., Бем Р. Вивчення комплексного впливу зовнішніх факторів на ефективність ремонтів полімерними композитними матеріалами // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2024. №1 (49).

DOI:10.31498/2225-6733.49.1.2024.321231.

135. ДСТУ EN ISO 2409:2014 метод оцінки стану лакофарбових покриттів та зовнішнього вигляду.

136. Нетяга А. В., Кусков Ю. М., Проскудін В. М., Жданов В. А., Лентюгов І. П. Формування шару високохромистого чавуну при електрошлаковому наплавленні в струмопідвідному кристалізаторі

квадратного перерізу. Сучасна електрометалургія. 2021. № 4. DOI: [10.37434/sem2021.04.02](https://doi.org/10.37434/sem2021.04.02).

137. Li, R.I., Psarev, D.N. & Kiba, M.R. Promising Nanocomposite Based on Elastomer F-40 for Repairing Base Members of Machines. Polym. Sci. Ser. D 12, 128–132 (2019). DOI : 10.1134/S1995421219020114

138. Колпаченко Н. М., Сайчук Ю. А., Луценко І. І., Романченко В. М., Аветісян В. К., Бантковський В. А., Маніло В. Л. Практикум з економіки підприємств технічного сервісу: навч. посіб. для студентів закл. вищ. освіти. - Харків: Діса плюс, 2021. 252 с. [ISBN 978-617-7927-59-3](https://doi.org/10.37434/sem2021.04.02)

139. Калініченко О. В. Економіка підприємства. Практикум : [навчальний посібник] / О. В. Калініченко, О. Д. Плотник. – К. : Кондор, 2012. – 600 с. [ISBN: 978-966-2781-07-6](https://doi.org/10.37434/sem2021.04.02)

140. Колпаченко Н. М., Сайчук Ю. А., Аветісян В. К., Бантковський В. А., Маніло В. Л. Економіка підприємства: навч. посіб. для студентів закл. вищ. освіти. - Харків: Діса плюс, 2019. 277 с. ISBN 978-617-7645-45-9

ДОДАТКИ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ПОГОДЖЕНО
Ректор ПДАУ
Олександр ГАЛИЧ
«10» 09 2025 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор Приватного підприємства
«ЛУБНИМАШ»
Юрій ПЛЕСКАЧ
«10» 09 2025 р.

АКТ

ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ У ВИРОБНИЦТВО

Замовник: Приватне підприємство «ЛУБНИМАШ», м. Лубни, Полтавська область

Керівник підприємства: Плескач Юрій Михайлович, директор

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи Потоскаєва Олексія Миколайовича на тему: «Розробка технології відновлення отворів у корпусних деталях сільськогосподарської техніки нанокompозитними матеріалами», виконаної під науковим керівництвом доктора технічних наук, професора Сайчука Олександра Васильовича, впроваджені у виробничу діяльність Приватного підприємства «ЛУБНИМАШ».

Термін упровадження: з 16 травня 2025 року по 05 грудня 2025 року

1. Вид упроваджених результатів

Розроблено та впроваджено технологію відновлення посадкових отворів корпусних деталей сільськогосподарських машин нанокompозитним матеріалом на основі еластомеру Ф-40 з додаванням металевих нанопорошків.

2. Характеристика масштабу впровадження

Технологія застосована під час ремонту корпусних деталей автотракторної та сільськогосподарської техніки, що експлуатується на підприємстві.

3. Форма впровадження

Впровадження здійснено шляхом застосування технологічного процесу, що включає підготовку поверхонь, приготування та нанесення нанокompозиту на основі еластомеру Ф-40, термічну витримку, калібрування отворів і контроль якості відновлених посадок підшипників.

4. Новизна результатів наукової роботи

Експериментально підтверджено підвищення зносостійкості та довговічності відновлених посадкових отворів, стабільність їх геометричних параметрів і зменшення витрат на ремонт порівняно з традиційними методами.

5. Дослідно-промислова перевірка

Експлуатаційні випробування техніки з відновленими посадками підшипників проводилися на базі ПП «ЛУБНИМАШ» у період з квітня по жовтень 2025 року. За час експлуатації відмов не зафіксовано, робота підшипникових вузлів була стабільною.

6. Упроваджені результати та економічний ефект

Розроблену технологію впроваджено у виробничий процес ремонту корпусних деталей. Річний економічний ефект становить 160 тис. грн, що забезпечено зменшенням витрат на придбання нових деталей, скороченням трудомісткості ремонту та простоїв техніки.

ВІД ВИКОНАВЦЯ:

Науковий керівник

Олександр САЙЧУК
«10» 09 2025 р.

Виконавець роботи

Олексій ПОТОСКАЄВ
«10» 09 2025 р.

ВІД ПІДПРИЄМСТВА:

Директор ПП «ЛУБНИМАШ»

Юрій ПЛЕСКАЧ
«10» 09 2025 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



ПОГОДЖЕНО
Ректор ПДАУ
Олександр ГАЛИЧ

«20» травня 2025 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ПАТ «Харківський
котельно-механічний завод»
Олександр КАРПЕНКО

«20» травня 2025 р.

АКТ

ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ У ВИРОБНИЦТВО

Замовник: Приватне акціонерне товариство «Харківський котельно-механічний завод» м. Харків, Харківська область

Керівник підприємства: Карпенко Олександр Вікторович

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи Потоскаєва Олексія Миколайовича, на тему: «Розробка технології відновлення отворів у корпусних деталях сільськогосподарської техніки нанокompозитними матеріалами» виконаної за наукового керівництва д.т.н., професора Сайчука Олександра Васильовича, впроваджено у виробничу діяльність ПрАТ «Харківський котельно-механічний завод».

Термін упровадження: з 20 квітня 2025 року по 06 жовтня 2025 року

1. Вид упроваджених результатів: розроблена технологія відновлення посадкових отворів корпусних деталей сільськогосподарських машин нанокompозитним матеріалом на основі еластомеру Ф-40.

2. Характеристика масштабу впровадження: ремонт корпусних деталей (редукторів, картерів, щитів та інших вузлів) автотракторної техніки, що експлуатується на підприємстві.

3. Форма впровадження: застосування технологічного процесу відновлення посадкових отворів, що включає підготовку поверхонь, приготування нанокompозиту на основі еластомеру Ф-40 з додаванням металевих нанопорошків (алюмінієвий – 2,0 мас. ч.; мідний – 1,6 мас. ч.), нанесення покриття, термічну обробку, калібрування та контроль якості відновлених посадок підшипників.

4. Новизна результатів наукової роботи: Отримано експериментально підтвержені результати щодо підвищення зносостійкості відновлених посадкових отворів, забезпечення стабільності геометричних параметрів та зменшення витрат на ремонт корпусних деталей у порівнянні з традиційними методами відновлення.

5. Дослідно-промислова перевірка: експлуатаційні випробування автотракторної техніки з відновленими посадками підшипників проведено на базі ПрАТ «Харківський котельно-механічний завод» у період квітень – жовтень 2025 року.

За період випробувань відмов, пов'язаних з недостатньою довговічністю відновлених посадкових місць підшипників, не зафіксовано.

6. Упроваджені результати: розроблену технологію впроваджено у виробничий процес ремонту корпусних деталей згідно з розробленою технологічною схемою. Річний економічний ефект від упровадження становить 160 тис. грн.

ВІД ВИКОНАВЦЯ:

Науковий керівник

Олександр САЙЧУК
«20» травня 2025 р.

Виконавець роботи

Олексій ПОТОСКАЄВ
«20» травня 2025 р.

ВІД ПІДПРИЄМСТВА:

Директор ПрАТ «Харківський
котельно-механічний завод»

Олександр КАРПЕНКО
«20» травня 2025 р.

