

УДК 621.9:678.742

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РЕМОНТУ ЗНОШЕНИХ ОТВОРІВ У КОРПУСНИХ ДЕТАЛЯХ АГРАРНИХ МАШИН ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НАНОКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

Д-р техн. наук О. В. Сайчук, асп. О. М. Потоскаєв

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF REPAIRING WORN HOLES IN HOUSING PARTS OF AGRICULTURAL MACHINES USING NANOCOMPOSITE MATERIALS

Dr.Sc. (Tech.) O. V. Saichuk, Postgraduate student O. M. Potoskaev

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.351813>



***Анотація.** Сільськогосподарська техніка під час експлуатації зазнає інтенсивних механічних навантажень, абразивного зносу, впливу агресивних середовищ і температурних коливань, що призводить до прискореного зношування корпусних деталей, зокрема зон сполучення елементів типу підшипників, валів і втулкових вузлів. Традиційні методи ремонту – наплавлення, механічна обробка зі збільшенням діаметра, втулкування – мають суттєві обмеження: потребують високотемпературних процесів, дорогого обладнання, а також можуть спричиняти деформації і тріщини в деталях із чавуну. Застосування полімерних нанокompозитних матеріалів відкриває нові можливості для відновлення зношених отворів без термічного впливу. Епоксидні та поліуретанові матриці, модифіковані нанонаповнювачами (графен, вуглецеві нанотрубки, нанодисперсний оксид алюмінію), демонструють високу адгезійну міцність, зносостійкість і стійкість до впливу агресивних середовищ. У статті подано результати досліджень властивостей нанокompозитних матеріалів, розроблено технологічний процес відновлення зношених отворів корпусних деталей із використанням цих матеріалів, проведено порівняння з традиційними методами. Встановлено, що застосування нанокompозитів дає змогу підвищити адгезійну міцність до 25 %, зменшити коефіцієнт тертя на 15-20 %, збільшити зносостійкість на 28-32 %, знизити собівартість ремонту на 20-25 %. Запропонована технологія є економічно доцільною, технологічно простою, не потребує високотемпературної обробки та може бути впроваджена на ремонтних підприємствах аграрного сектору.*

***Ключові слова:** нанокompозитні матеріали, полімери, відновлення отворів, корпусні деталі, адгезія, зносостійкість, ремонт, аграрна техніка, епоксидна смола, графен.*

***Abstract.** Agricultural machinery components are frequently exposed to intensive cyclic loads, abrasive wear, and aggressive environmental factors, which cause accelerated deterioration of housing parts, particularly bearing and shaft seats. Traditional repair methods such as welding, surfacing, or installing bushings rely on high-temperature processes that often lead to structural deformation, residual stresses, or cracking of cast iron elements, and additionally require expensive*

equipment and significant labor costs. In contrast, the application of polymer nanocomposite materials provides a technological simple and energy-efficient alternative for the restoration of worn holes without thermal influence. Polymer matrices based on epoxy and polyurethane resins, modified with various nanofillers such as graphene, carbon nanotubes, and nano-aluminum oxide, demonstrate improved mechanical properties, enhanced adhesion to metal nano-aluminum oxide, demonstrate improved mechanical properties, enhanced adhesion to metal surfaces, increased wear resistance, and high chemical stability during operation.

The present study summarizes experiments investigations on the deformation-strength properties of selected nanocomposite, evaluates their tribological behavior under conditions typical for agricultural machinery operation, and proposes a practical restoration technology for worn housing holes. The methodology includes surface preparation, controlled application of the nanomodified polymer composition, and curing under optimized conditions. Comparative analysis with conventional repair approaches shows that the use of nanocomposites increases adhesion strength by up to 25 %, reduces the friction coefficient by 15-20 %, improves wear resistance by 28-32 %, and decreases overall repair costs by 20-25 %. The developed technology is cost-effective, reliable, and suitable for implementation in repair workshops without the need for specialized high-temperature processing equipment, which confirms its practical relevance for extending the service life of agricultural machinery components.

Keywords: nanocomposite materials, polymers, restoration of holes, housing parts, adhesion, wear resistance, agricultural machinery, epoxy resin, graphene, repair technology.

Вступ. В умовах сучасного аграрного виробництва зростає потреба в підвищенні ефективності ремонту та відновлення сільськогосподарської техніки. Значна частка відмов машин пов'язана з виходом із ладу корпусних деталей, зокрема зношуванням отворів під підшипники та вали. Традиційні методи ремонту, такі як наплавлення, зварювання, втулкування, не завжди забезпечують довготривалий результат і часто супроводжені високими витратами часу та ресурсів. Полімерні нанокompозитні матеріали відкривають нові перспективи завдяки поєднанню високих механічних властивостей, стійкості до зношування та корозії, низької густини і технологічної простоти застосування. Введення нанорозмірних частинок у полімерну матрицю дає змогу значно підвищити її експлуатаційні характеристики – забезпечити зростання адгезійних характеристик і міцності на стиск, теплопровідність, що сприяє більш рівномірному відведенню тепла з відремонтованої ділянки та зниженню ризику локальних температурних напружень під час роботи вузла, а також

зменшенню усадки та зниженню коефіцієнта тертя. Такий підхід особливо актуальний для ремонту чавунних і сталевих деталей, що працюють у жорстких умовах аграрного виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика підвищення ефективності ремонту корпусних деталей сільськогосподарської техніки є актуальною через інтенсивний знос посадкових отворів під час експлуатації машин. У роботах [3] досліджено традиційні методи ремонту – наплавлення, зварювання, втулкування, які, хоча і забезпечують відновлення геометричних параметрів, мають суттєві недоліки: високу трудомісткість, енергоємність і ризик виникнення термічних деформацій у чавунних корпусних деталях.

Автори роботи [7] звертають увагу на перспективність полімерних композитів як альтернативу металевим технологіям відновлення. Значну увагу приділено вивченню властивостей полімерних нанокompозитних матеріалів. У працях [2, 10] наведено результати впровадження нанокompозитів у машинобудуванні, які підтверджують покращення механічних і

трибологічних характеристик полімерних систем за рахунок введення нанонаповнювачів. Додавання графену або вуглецевих нанотрубок до епоксидної матриці суттєво підвищує зносостійкість і знижує коефіцієнт тертя [4, 6].

Вітчизняні дослідження [5, 9] також підтверджують позитивний вплив наночастинок на адгезійні властивості полімерних систем і їхню стійкість щодо механічних навантажень. Проте більшість робіт зосереджені на матеріалознавчих аспектах і не розглядають повний технологічний процес ремонту зношених отворів корпусних деталей із використанням нанокompозитів [1, 8].

Отже, незважаючи на наявність значної кількості публікацій, питання комплексного розроблення та практичної реалізації технології ремонту корпусних деталей із застосуванням полімерних нанокompозитів залишається недостатньо дослідженим, що визначає актуальність цього дослідження.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є обґрунтування та експериментальна перевірка ефективності технології ремонту зношених отворів у корпусних деталях сільськогосподарської техніки з використанням полімерних нанокompозитних матеріалів.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- дослідити вплив типу полімерної матриці та нанонаповнювача на механічні, адгезійні, трибологічні властивості композицій;

- розробити технологічний процес відновлення зношених отворів корпусних деталей із застосуванням нанокompозитів;

- оцінити адгезійну міцність і зносостійкість отриманих покриттів;

- порівняти традиційні методи ремонту щодо якості, тривалості та собівартості процесу

В основі досліджень лежить застосування полімерних нанокompозитних матеріалів для відновлення зношених

отворів у корпусних деталях сільськогосподарських машин, які зазнають значних механічних навантажень і агресивного впливу експлуатаційних факторів [8]. Вибір саме полімерних нанокompозитів зумовлений їхніми унікальними властивостями, що поєднують високу механічну міцність, зносостійкість, покращену адгезію до металевих поверхонь, а також можливість нанесення без використання високотемпературних процесів, що є критичним для чавунних корпусних деталей.

Для формування нанокompозитних матеріалів використовували епоксидні та поліуретанові матриці, які модифіковані нанонаповнювачами: графеном, вуглецевими нанотрубками та нанодисперсним оксидом алюмінію [7]. Вибір цих наповнювачів обґрунтований їхньою високою механічною міцністю, термостійкістю і здатністю значно покращувати фізико-механічні властивості полімерних систем навіть за малих концентрацій.

Композиційні матеріали готували за допомогою ультразвукового диспергування нанонаповнювачів у полімерній матриці, що забезпечувало рівномірне розподілення частинок і запобігало агрегації. Концентрації наповнювачів були вибрані експериментально в межах 0,3-2 % за масою, що допомагало досягти оптимального балансу між механічними властивостями та технологічністю нанесення.

Технологія ремонту зношених отворів починалася з підготовки поверхні: очищення від мастильних матеріалів, іржі та бруду, механічної обробки для підвищення шорсткості та знежирення. Така підготовка забезпечувала необхідну адгезію полімерного нанокompозита до металу.

Наносили композит заливанням або шпателем із подальшим формуванням геометрії отвору за допомогою спеціальних оправок. Полімеризація відбувалася за кімнатної температури протягом 24 год, що виключало термічні деформації корпусних деталей.

Експериментальні дослідження з адгезійної міцності проводили за методом відриву, що показало збільшення міцності зчеплення відновленого шару з металом на 23-25 % порівняно з чистою полімерною матрицею. Це пояснюють як механічним зачепленням на шорсткій поверхні, так і хімічною взаємодією нанонаповнювачів із металом [8].

Випробування на зносостійкість проводили за стандартними методиками трибологічних тестів, які імітували робочі умови підшипникових вузлів. Результати свідчать про зниження коефіцієнта тертя на 15-20 %, що значно зменшує теплове навантаження та підвищує ресурс деталі.

Важливим фактором є також економічна ефективність запропонованої технології. Порівняння із традиційними методами наплавлення показало скорочення часу ремонту приблизно на 30 %, зниження енергоспоживання та собівартості на 20-25 %. Окрім того, відсутність нагрівання корпусних деталей знижує ризик появи термічних тріщин і деформацій, що позитивно впливає на надійність ремонту [9].

Додаткові експлуатаційні випробування показали збільшення ресурсу корпусних деталей після ремонту на основі нанокompозитів у середньому на 30 %, що свідчить про високий потенціал технології для використання в аграрному секторі.

Основна частина дослідження. Для досліджень використовували епоксидні та поліуретанові матриці, модифіковані нанонаповнювачами – графеном, вуглецевими нанотрубками та нанодисперсним оксидом алюмінію [4-6]. Композиції готували методом ультразвукового диспергування, що забезпечувало рівномірний розподіл частинок і запобігало їхній агрегації. Оптимальна концентрація наповнювачів становила 0,3-2 % за масою. Поверхню отворів очищували, шліфували та знежирювали, забезпечуючи шорсткість $Ra = 5-10$ мкм [1, 5]. Наносили матеріал заливанням або шпателем із подальшим

формуванням отвору за допомогою оправки. Полімеризація відбувалася за температури 20-25 °C протягом 24 год. Випробування показали підвищення адгезійної міцності на 23-25 % і зниження коефіцієнта тертя на 15-20 % порівняно з базовими полімерними матеріалами. Зносостійкість збільшилася на 28-32 %, що забезпечує подовження ресурсу корпусних деталей у середньому на 30 %. Економічний аналіз підтвердив доцільність застосування нанокompозитів: скорочення часу ремонту до 30 %, зниження енергоспоживання і собівартості на 20-25 %. Запропонована технологія є простою, економічно вигідною та придатною для впровадження на ремонтних підприємствах аграрного сектору.

Отримані результати підтверджують, що полімерні нанокompозити є перспективним напрямом у сфері відновлення зношених посадкових місць, поєднуючи механічну ефективність із технологічною простотою та економічністю [6, 9].

Важливим етапом технології відновлення зношених отворів є вибір оптимальних параметрів підготовки поверхні корпусної деталі. Встановлено, що для досягнення максимальної адгезії полімерного нанокompозита необхідно забезпечити певний рівень шорсткості поверхні. Надмірно гладка поверхня призводить до зниження механічного зачеплення, тоді як надто груба може спричинити нерівномірний розподіл напружень і погіршення адгезії. Найкращі результати були отримані за шорсткості Ra 5-10 мкм, чого досягають за допомогою механічного шліфування або піскоструминної обробки.

Перед нанесенням нанокompозита поверхню знежирювали ізопропіловим спиртом, що допомагає видалити пил, масла та інші забруднювачі, які можуть утворити бар'єр для міцного зчеплення. Цей простий, але важливий крок істотно підвищував якість ремонту і повторюваність результатів.

Приготування полімерних нанокомпозитів потребувало точного дотримання пропорцій і ретельного змішування компонентів. Ультразвукове диспергування забезпечувало рівномірний розподіл наночастинок і запобігало їхній агрегації, що критично для досягнення високих експлуатаційних характеристик матеріалу. Занадто велика концентрація нанонаповнювачів (>2 % мас.) призводила до зниження реологічних властивостей суміші, ускладнюючи її нанесення та формування рівної поверхні.

Як основні типи полімерних матриць були вибрані епоксидні смоли через їхню високу хімічну стійкість, міцність і добру адгезію, а також поліуретанові системи, які відрізняються більшою еластичністю і ударною міцністю. Комбінування типів матриць і нанонаповнювачів давало змогу адаптувати матеріал під конкретні умови експлуатації і типи навантажень.

Наносили нанокомпозитний матеріал на підготовлену поверхню вручну або за допомогою спеціальних оправок, що забезпечували потрібну форму і розміри відновленого отвору. Важливою перевагою запропонованої технології є відсутність необхідності застосування високотемпературних режимів полімеризації – процес проходив за кімнатної температури (20-25 °C), що допомагало уникнути термічних напружень і деформацій металевих деталей, характерних для традиційних методів наплавлення або зварювання.

Після полімеризації відновлені отвори проходили механічну обробку (шліфування, фрезерування) до номінального розміру з дотриманням необхідних допусків і шорсткості поверхні, що гарантувало коректну роботу вузла для монтажу підшипників або інших елементів.

Лабораторні дослідження міцності адгезії показали стабільне підвищення зчеплення на 23-25 % порівняно з базовими полімерними матеріалами без нанонаповнювачів. Це підтверджує важливу роль наночастинок у формуванні міцного

контакту між полімером і металом за рахунок підвищення площі контактної поверхні і взаємодії на молекулярному рівні.

Трибологічні випробування дали змогу виявити суттєве зниження коефіцієнта тертя (на 15-20 %), що позитивно впливає на довговічність посадкових місць і знижує енергетичні втрати роботи вузлів. Зносостійкість матеріалів за стандартними тестами підвищена на 28-32 %, що дає змогу очікувати значного подовження строку служби відновлених деталей.

Експлуатаційні випробування на реальних вузлах сільськогосподарської техніки підтвердили лабораторні дані: після ремонту нанокомпозитами знос корпусних деталей знижений, а ресурс збільшений у середньому на 30 %, що є вагомим аргументом для впровадження технології.

Економічний аспект також був детально проаналізований. Використання нанокомпозитів дало змогу знизити загальну собівартість ремонту на 20-25 %, що пов'язано з відсутністю дорогого термічного устаткування, меншими затратами часу на ремонт і більшою надійністю відновлених деталей, що зменшує кількість повторних ремонтів.

Отже, запропонована технологія поєднує науково обґрунтовані підходи для вибору матеріалів і методів нанесення, що допомагає отримати якісне і економічно вигідне рішення для ремонту зношених отворів у корпусних деталях аграрної техніки.

Одним із головних аспектів ефективності застосування полімерних нанокомпозитів у ремонті корпусних деталей є вибір оптимальних типів нанонаповнювачів, що значною мірою визначають кінцеві механічні, трибологічні та хімічні властивості матеріалу. Під час досліджень були проаналізовані три основні типи наповнювачів: графен, вуглецеві нанотрубки та нанодисперсний оксид алюмінію.

Графен має унікальну двовимірну структуру, що забезпечує високу механічну міцність і виняткові теплопровідні властивості. Введення графенових нанопластинок в епоксидну матрицю дало змогу значно покращити розподіл напружень у полімері та підвищити його зносостійкість. Крім того, графен знижував коефіцієнт тертя, що позитивно впливало на роботу посадкових місць.

Вуглецеві нанотрубки (ВНТ) мають високу міцність на розтяг, жорсткість і хімічну стійкість. Їх додавання до полімерних матриць підвищувало ударну міцність композиції і покращувало її адгезійні властивості за рахунок збільшення контактної площі та формування ефективної мережі взаємозв'язаних наноструктур [2].

Нанодисперсний оксид алюмінію (Al_2O_3) має високу твердість і термостійкість, тому використання цього наповнювача сприяло підвищенню жорсткості і зносостійкості полімерних композицій, особливо в умовах агресивного впливу абразивних частинок і температурних коливань, характерних для сільськогосподарських умов експлуатації.

Оптимальні концентрації нанонаповнювачів визначали експериментально, адже надлишок може призвести до агрегації, що знижує ефективність і ускладнює нанесення матеріалу [7]. Найкращі результати були отримані за концентрацій від 0,5 до 1,5 % масових для графену, 0,3-1 % – вуглецевих нанотрубок, 1-2 % – оксиду алюмінію.

Щодо полімерних матриць, то епоксидні смоли були вибрані через високу хімічну стійкість і твердість, що забезпечує міцне зчеплення з металом. Водночас поліуретанові матриці додавали гнучкості, підвищуючи ударну стійкість відновлених отворів і знижуючи крихкість покриття, що є важливим для деталей, які працюють в умовах вібраційних навантажень.

Під час експериментів було встановлено, що суміш епоксидної смоли з 1 % графену і 1 % вуглецевих нанотрубок

демонструє оптимальне поєднання механічних і трибологічних властивостей. Вона забезпечує високу адгезійну міцність (понад 25 МПа), знижений коефіцієнт тертя (0,15-0,18 порівняно зі стандартним 0,22-0,25) і значне підвищення зносостійкості.

Технологія нанесення композиції була випробувана на корпусних деталях із чавуну і сталі, що мають посадкові отвори діаметром від 20 до 60 мм, типові для сільськогосподарської техніки. Після нанесення та полімеризації матеріал легко обробляли механічно з дотриманням допусків, необхідних для встановлення підшипників і втулок [10].

Трибологічні випробування, що імітували умови роботи деталей в агресивному середовищі, підтвердили значне зниження зношування за рахунок ефективного зменшення тертя і підвищення міцності покриття. Ресурс деталей, відновлених із застосуванням полімерних нанокомпозитів, збільшився в середньому на 30-35 % порівняно з традиційними ремонтними методами.

Економічний аналіз технології показав її конкурентоспроможність і перспективність для впровадження в ремонтних цехах агропідприємств. Основними перевагами є низька собівартість матеріалів, відсутність необхідності у спеціалізованому обладнанні для термічної обробки, а також скорочення часу ремонту [3].

Загалом результати досліджень підтверджують доцільність впровадження запропонованої технології відновлення отворів у корпусних деталях сільськогосподарської техніки з використанням полімерних нанокомпозитних матеріалів. Це дасть змогу значно підвищити надійність машин, знизити експлуатаційні витрати і підтримати сталий розвиток аграрного сектору.

Висновки. Застосування полімерних нанокомпозитних матеріалів для ремонту зношених отворів у корпусних деталях аграрної техніки допомагає підвищити їхній ресурс, знизити собівартість і скоротити тривалість ремонту. Технологія є

універсальною та може бути впроваджена на більшості ремонтних підприємств без значних капіталовкладень.

Розроблена технологія відновлення зношених отворів у корпусних деталях сільськогосподарської техніки із застосуванням полімерних нанокompозитних матеріалів показала високу ефективність. Запропонований метод допомагає значно підвищити адгезійну міцність зчеплення полімерного матеріалу з металом,

покращити зносостійкість і знизити коефіцієнт тертя. Відновлені деталі демонструють збільшений ресурс експлуатації, що позитивно впливає на надійність і економічність аграрної техніки. Технологія є економічно вигідною, технологічно простою і не потребує складного обладнання або високотемпературних процесів, що робить її перспективною для широкого впровадження в ремонтних цехах агропідприємств.

Список використаних джерел

1. Дем'янчук А. В., Костенко М. І. (2022). Дослідження полімерних композиційних матеріалів для відновлення деталей машин. *Вісник машинобудування та транспорту*. (3). 45–52.
2. Horvath J. & Varga M. (2021). Nanocomposite polymers in machinery repair. *Journal of Materials Engineering*. 12(4). 215–223.
3. Іваненко С. П., Мельник Р. О. (2020). Технології ремонту посадкових місць корпусних деталей сільськогосподарської техніки. *Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. (8). 85–91.
4. Li X. & Zhang Y. (2021). Graphene reinforced epoxy composites for wear resistance. *Composites Science and Technology*. 213. 108957.
5. Кравченко Ю. В., Григоренко О. М. (2023). Відновлення отворів у чавунних корпусних деталях із використанням полімерних матеріалів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільськогосподарства*. (4). 102–108.
6. Kim S. et al. (2020). Effect of nanofillers on tribological properties of polymer composites. *Tribology International*. 146. 106216.
7. Петров Д. О., Шевченко І. М. (2021). Використання епоксидних композитів для ремонту обладнання. *Машинобудування та інженерія*. (5). 60–66.
8. Zhang L. & Wu H. (2019). Mechanical properties of polymer composites with carbon nanotubes. *Materials Science and Engineering A*. 753. 175–184.
9. Коваленко М. С., Лисенко В. П. (2022). Вплив наночастинок на адгезію полімерних композицій. *Сучасні матеріали в машинобудуванні*. (2). 33–39.
10. Singh R. & Sharma P. (2021). Advances in polymer nanocomposites for repair technologies. *Polymer Composites*. 42(5). 1687–1701.

Сайчук Олександр Васильович, доктор технічних наук, професор кафедри механічної та електричної інженерії, Полтавський державний аграрний університет. ORCID iD: 0000-0001-5118-838X. Тел.: (0532) 56-96-87. E-mail: oleksandr.saichuk@pdaa.edu.ua.
Потоскаєв Олексій Миколайович, аспірант кафедри механічної та електричної інженерії, Полтавський державний аграрний університет. ORCID iD: 0009-0005-3065-9652. Тел.: +380966902004. E-mail: alexei.alexei@ukr.net.

Saichuk Oleksandr, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Mechanical and Electrical Engineering, Poltava State Agrarian University. ORCID iD: 0000-0001-5118-838X. Тел.: (0532) 56-96-87. E-mail: oleksandr.saichuk@pdaa.edu.ua.
Potoskaev Olekii, postgraduate student, Department of Mechanical and Electrical Engineering, Poltava State Agrarian University. ORCID iD: 0009-0005-3065-9652. Тел.: +380966902004. E-mail: alexei.alexei@ukr.net.

Статтю прийнято 28.11.2025 р.