МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерних технологій та професійної освіти
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
«___»_____ 2026 р.
Зав. кафедри _д.т.н., професор___
(науковий ступінь, вчене звання)
_____ __Володимир ДІДУР___
(підпис) (ініціали, прізвище)

Кваліфікаційна робота (дипломний проект)

перший (бакалаврський)
(назва освітнього рівня)

тема проекту: «Аналіз надійності та зносостійкості різальних елементів агрегатів No-Till:вибір матеріалів та методів поверхневого зміцнення»

Виконав: студент 3 курсу, групи 31к-з-ім
освітньої програми __бакалавра_____
спеціальності _208 «Агроінженерія»__
_____Вадим ОСАУЛЕНКО_____
(прізвище та ініціали)
)

Керівник к.т.н., доцент Іван ЛІСОВИЙ___
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Умань – 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерних технологій та професійної освіти
Кафедра агроінженерії

Освітня програма «Бакалавр»
Спеціальність 208 «Агроінженерія»
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри
_____ Володимир ДІДУР
«___» _____ 2026 р.
.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ)

ОСАУЛЕНКУ Вадиму Олексійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Аналіз надійності та зносостійкості різальних елементів агрегатів No-Till:вибір матеріалів та методів поверхневого зміцнення»

керівник роботи Лісовий І.О., к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від
" 08 " травня 2026 р. № 01-06/166

2. Строк подання студентом роботи 15.05.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: технічні характеристики посівних агрегатів No-Till та агротехнічні вимоги до прямої сівби; фізико-механічні показники непорушеного ґрунту; властивості базових конструкційних сталей (65Г, 30MnB5) та зносостійких матеріалів (електроди Т-590); результати попередніх трибологічних досліджень робочих органів; сучасна наукова, патентна, нормативно-технічна та періодична література з агроінженерії, трибології та інженерії поверхні.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ; 1. Аналіз стану питання щодо надійності та зносостійкості різальних елементів агрегатів No-Till; 2. Теоретичні та експериментальні дослідження методів підвищення зносостійкості різальних елементів; 3. Охорона праці при експлуатації та ремонті агрегатів No-Till; 4. Обґрунтування досягнутих результатів з підвищення надійності різальних елементів; Загальні висновки; Список використаних джерел; Додатки.

5. Ілюстративний матеріал: підготувати ілюстративний матеріал у вигляді презентації (до 10 слайдів) як додаток до доповіді за темою дипломної роботи

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Едуард ПРОКОПЕНКО, доцент		

7. Дата видачі завдання 6 жовтня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	При-мітка
1.	Підбір та вивчення літературних джерел, підготовка вступу.	03.12.2025 р.	
2.	**Розділ 1.** Аналіз стану питання щодо надійності та зносостійкості різальних елементів агрегатів No-Till.	29.12.2025 р.	
3.	**Розділ 2.** Теоретичні та експериментальні дослідження методів підвищення зносостійкості різальних елементів.	04.02.2026 р.	
4.	**Розділ 3.** Охорона праці при експлуатації та ремонті агрегатів No-Till.	01.04.2026 р.	
5.	**Розділ 4.** Обґрунтування досягнутих результатів з підвищення надійності різальних елементів.	01.05.2026 р.	
6.	Формулювання загальних висновків, виконання ілюстративної частини роботи (креслення, графіки, додатки).	12.05.2026 р.	
7	Остаточне оформлення розрахунково-пояснювальної записки та представлення роботи керівнику на нормоконтроль і перевірку.	15.05.2026р.	

Студент _____ Вадим ОСАУЛЕНКО
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Іван ЛІСОВИЙ
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП 5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ЩОДО НАДІЙНОСТІ ТА ЗНОСОСТІЙКОСТІ РІЗАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ АГРЕГАТІВ NO-TILL 6
1.1 Аналіз умов роботи та взаємодії різальних елементів із ґрунтом за технологією No-Till 6
1.2 Види, механізми зношування та причини відмов робочих органів ґрунтообробних і посівних машин 8
1.3 Аналіз та вибір матеріалів для виготовлення різальних деталей 10
1.4 Огляд сучасних методів поверхневого зміцнення (лазерне наплавлення, нанесення композитних покриттів, біоміметичні структури) 12
1.5 Висновки до розділу 1, формулювання мети та завдань дослідження 14
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ РІЗАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ 16
2.1 Програма та методика проведення лабораторних і польових досліджень 16
2.2 Дослідження трибологічних властивостей обраних конструкційних матеріалів 18
2.3 Оцінка впливу методів поверхневого зміцнення на зміну мікроструктури та зносостійкість робочих органів 19
2.4 Аналіз результатів випробувань модифікованих різальних елементів в умовах експлуатації 22
Висновки до розділу 24
РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА РЕМОНТІ АГРЕГАТІВ NO-TILL 25
3.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів під час експлуатації сівалок No-Till та зміцнення їх робочих органів 25
3.2 Забезпечення санітарно-гігієнічних умов праці при виконанні робіт із поверхневого зміцнення різальних елементів (наплавлення та термообробка) 26
3.3 Прогнозування ризиків: моделювання сценаріїв небезпечних ситуацій під час роботи з посівними комплексами прямої сівби 27
Висновки до розділу 28
РОЗДІЛ 4. ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСЯГНУТИХ РЕЗУЛЬТАТІВ З ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РІЗАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ 29
4.1 Технічне обґрунтування доцільності застосування зміцнених деталей 29
4.2 Розрахунок економічної ефективності від впровадження методів поверхневого зміцнення 30
4.3 Екологічне та технологічне значення підвищення надійності агрегатів No-Till 33
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 35
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 37
ДОДАТКИ 42

ВСТУП

Актуальність теми. Технологія прямої сівби (No-Till) висуває екстремальні вимоги до експлуатаційної надійності посівних комплексів, оскільки їх робочі органи змушені прорізати непорушений ґрунт із товстим шаром пожнивних залишків в умовах високих динамічних та трибологічних навантажень [17, 23].

Серійні різальні деталі з базових сталей (типу 65Г, 30MnB5) піддаються інтенсивному абразивному зношуванню [11]. Їх швидке затуплення знижує агротехнічну якість сівби, зумовлює експоненційне зростання тягового опору Rx, спричиняє перевитрату палива та збільшує час аварійних простоїв техніки [29].

Відповідно, нагальною є потреба впровадження інноваційних і доступних методів підвищення зносостійкості інструменту. Створення градієнтних структур методами інженерії поверхні (локальним електродуговим наплавленням) у синергії з біоміметичним макропрофілюванням леза забезпечує ефект самозагострювання [26]. Таке комплексне рішення є надзвичайно актуальним, оскільки гарантує стабільність енергетичних показників агрегатів і підвищує рентабельність застосування технології No-Till [30].

Об’єкт дослідження – технологічний процес абразивного зношування та підвищення експлуатаційної надійності різальних елементів посівних комплексів прямої сівби за технологією No-Till.

Предмет дослідження – трибологічні властивості, макрогеометрія (включаючи біоміметичні профілі), структурно-фазовий стан та енергетичні показники модифікованих робочих органів із поверхневим зміцненням.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ЩОДО НАДІЙНОСТІ ТА ЗНОСОСТІЙКОСТІ РІЗАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ АГРЕГАТІВ NO-TILL

1.1 Аналіз умов роботи та взаємодії різальних елементів із ґрунтом за технологією No-Till

Технологія нульового обробітку ґрунту (No-Till) кардинально відрізняється від традиційних методів землеробства тим, що виключає механічне перевертання пласта, залишаючи поверхню поля вкритою пожнивними залишками або мульчею. Відмова від оранки створює специфічні фізико-механічні умови для роботи ґрунтообробних та посівних агрегатів [17].

Зміна фізико-хімічних властивостей ґрунту при консервативному обробітку призводить до його природного ущільнення у верхніх шарах, збереження капілярної системи та накопичення органічної маси на поверхні. Відповідно, різальні елементи агрегатів (дискові ножі, колтери, сошники сівалок прямого посіву) взаємодіють із складним, багатокомпонентним середовищем [23].

Сила тягового опору Rx при взаємодії дискового робочого органу зі щільним ґрунтом визначається за математичною залежністю:

$$R_x = k \cdot a \cdot b + \varepsilon \cdot a \cdot b \cdot v^2 \tag{1.1}$$

де k – питомий опір ґрунту деформації; a – глибина входження різального елемента в ґрунт; b – товщина леза (або ширина захвату профілю); ε – коефіцієнт динамічного опору середовища; v – швидкість руху агрегату.

Умови роботи та основні фактори впливу середовища на деталі наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Основні фактори впливу ґрунтового середовища на різальні елементи агрегатів No-Till

Фактор середовища	**Характер впливу на різальний елемент**	**Наслідок для робочого органу**
Пожнивні залишки (солома, стерня)	Потреба у високому зусиллі перерізання без вдавлювання у насіннєве ложе	Зниження гостроти леза, затуплення
Непорушений ґрунт	Високий тяговий опір та питомий тиск на поверхню деталі	Пластична деформація, відхилення геометрії
Абразивні включення (кварц)	Процеси мікрорізання твердими мінеральними частинками	Інтенсивне абразивне зношування поверхні

Механізм взаємодії різального інструмента із системою «ґрунт – пожнивні залишки» характеризується складними трибологічними та силовими процесами, що наочно відображає схема, подана на рисунку (додаток А).

Під час виконання технологічної операції лезо одночасно піддається дії кількох руйнівних факторів. Інтенсивне абразивне тертя внаслідок взаємодії з твердими частинками ґрунту викликає процеси мікрорізання та викришування матеріалу з поверхні леза, що призводить до втрати його первинної форми [11]. Ударні та втомні навантаження виникають при контакті з ущільненими грудками ґрунту, прихованим камінням або міцними кореневими системами, що здатне спричинити макроскопічні сколи різальної кромки [26]. Адгезійні явища у вигляді налипання вологого ґрунту на робочі поверхні змінюють профіль інструмента, збільшують площу тертя, знижують якість прорізання мульчі та критично підвищують загальні енерговитрати на переміщення агрегату [37].

Таким чином, умови експлуатації різальних елементів за технологією No-Till є екстремальними. Високий опір непорушеного ґрунту у поєднанні з необхідністю чистого перерізання рослинної маси вимагає від робочих органів виняткової міцності, довговічності та здатності зберігати геометрію різальної кромки (самозагострювання) протягом усього циклу сільськогосподарських робіт [23]. Це обумовлює технічну необхідність пошуку нових зносостійких матеріалів та ефективних методів їх поверхневого зміцнення.

1.2 Види, механізми зношування та причини відмов робочих органів ґрунтообробних і посівних машин

Робочі органи ґрунтообробних та посівних машин функціонують у надзвичайно складних трибологічних умовах, де ґрунт діє як потужне і мінливе абразивне середовище. Зношування деталей є незворотним процесом, який обмежує їхній експлуатаційний ресурс і безпосередньо впливає на енергоємність технологічних операцій [13]. Згідно з дослідженнями, саме абразивне зношування є домінуючою формою деградації в сільськогосподарській техніці [11].

Механізми деградації поверхні різальних елементів є комплексними і зазвичай включають одночасну дію кількох видів зношування. Для теоретичного опису інтенсивності об'ємного зношування V доцільно використовувати базове рівняння Арчарда:

$$V = K \cdot \frac{W \cdot L}{H} \tag{1.2}$$

де K – безрозмірний коефіцієнт зношування, що залежить від умов тертя; W – нормальне навантаження на контактну поверхню; L – шлях тертя; H – твердість матеріалу поверхні.

Основні види зношування різальних елементів:

Абразивне зношування: Виникає внаслідок механічної взаємодії поверхні металу з твердими мінеральними частинками ґрунту, переважно кварцом та різноманітними силікатами [33]. Цей процес супроводжується механізмами мікрорізання, мікровиорюванням (пластичним відтісненням матеріалу) та мікротріщиноутворенням у поверхневих шарах сталі. Оскільки твердість частинок ґрунту часто перевищує твердість конструкційного матеріалу, вони залишають глибокі борозни та сприяють інтенсивному викришуванню металу [26].

Ударно-абразивне зношування та втомне руйнування: Спостерігаються під час зустрічі різальних елементів із прихованими перешкодами (каміння) або надмірно ущільненими грудками непорушеного ґрунту, що є характерним для технології No-Till. Циклічні динамічні навантаження призводять до виникнення мікротріщин, які поступово поширюються углиб матеріалу, викликаючи локальні відколи різальної кромки або повне руйнування деталі [28].

Корозійно-механічне зношування (трибокорозія): Має місце під час роботи у вологих ґрунтах, що містять розчинені мінеральні солі, кислоти та залишки добрив [31]. Постійне тертя абразивних частинок руйнує та видаляє захисні пасивні оксидні плівки з поверхні деталі. Це відкриває доступ хімічно активному середовищу до чистого металу, що значно прискорює його окиснення та подальше механічне видалення [18].

Адгезійне зношування: Пов'язане з явищем налипання вологого ґрунту на робочі поверхні. Це не лише порушує кінематику руху ґрунтового пласта, але й суттєво підвищує загальний коефіцієнт тертя агрегату [37]. Додаткове тертя може призводити до локального підвищення температури на поверхні леза, що негативно впливає на фізико-механічні властивості металу [20].

Відмова робочого органу настає тоді, коли його стан унеможливлює виконання технологічної операції із заданими агротехнічними вимогами або робить подальшу експлуатацію економічно недоцільною [6].

Основними причинами відмов є:

Втрата геометричної форми леза (затуплення): Унаслідок абразивного тертя різальна кромка заокруглюється, кут загострення збільшується. Це призводить до нездатності сошника чи диска ефективно перерізати пожнивні залишки, вдавлюючи їх у ґрунт, що критично порушує контакт насіння з ґрунтом [23].

Критичне зменшення маси та профілю: Зношування робочих площин зменшує товщину та ширину деталі, знижуючи її несучу здатність нижче допустимих меж згідно з розрахунками опору матеріалів [13].

Крихке макроруйнування: Виникає у вигляді масштабних сколів леза або перелому всієї деталі через перевищення межі міцності або внаслідок накопичення втомних пошкоджень від високих ударних навантажень [32].

Економічна відмова: Зношування порушує оптимальні кути різання, що викликає експоненційне зростання тягового опору. Як наслідок, різко збільшуються витрати палива енергозасобом та інтенсифікується зношування елементів трансмісії, що вимагає негайної заміни різального вузла [29].

1.3 Аналіз та вибір матеріалів для виготовлення різальних деталей

Вибір конструкційного матеріалу для виготовлення різальних елементів ґрунтообробних та посівних машин (лемешів, доліт, дискових ножів, лап) є визначальним фактором забезпечення їхньої експлуатаційної надійності. Оптимальний матеріал повинен поєднувати високу поверхневу твердість H (для опору інтенсивному абразивному зношуванню) з достатньою ударною в'язкістю KCU серцевини деталі з метою запобігання крихкому макроруйнуванню під час динамічних навантажень [26].

Критерій опору матеріалу абразивному зношуванню Kw в інженерній практиці часто оцінюється за наступною математичною залежністю:

$$Kw = H/E \tag{1.3}$$

де H – твердість поверхневого шару матеріалу; E – модуль пружності (модуль Юнга) матеріалу.

Історично в агроінженерії широко використовувалися ресорно-пружинні вуглецеві та марганцеві сталі (марки 65Г, леговані сталі типу 30MnB5 або 35MnB5), які піддавалися стандартній об’ємній термічній обробці [13]. Однак в екстремальних умовах консервативного землеробства за технологією No-Till традиційні матеріали демонструють недостатній ресурс внаслідок прискореної абразивної деградації різальних кромок.

Сучасні трибологічні дослідження та передова виробнича практика виділяють наступні перспективні напрямки у матеріалознавстві робочих органів:

Борвмісні леговані сталі (27MnB5, 22MnCrB5). Мікролегування сталі бором (у межах 0,001…0,005 %) суттєво підвищує її прогартовуваність. Це дозволяє формувати дрібнодисперсну мартенситну структуру на значну глибину при гартуванні, забезпечуючи високі показники границі міцності σВ та твердості поверхневого шару. Дослідження трибокорозії та абразивного зношування гарячеформованої сталі марки 22MnCrB5 підтверджують її високу стійкість в агресивних ґрунтових середовищах [31]. Сталь 27MnB5 наразі є промисловим стандартом для виготовлення зносостійких дисків та лемешів, оскільки демонструє кращі показники зварюваності порівняно з високовуглецевими аналогами [4].

Використання полімерних та композитних матеріалів. Інноваційним підходом для специфічних умов обробітку є застосування високоміцних інженерних полімерів для виготовлення або футерування робочих органів. Зазначені матеріали характеризуються низьким коефіцієнтом тертя ковзання μ, що забезпечує різке зменшення адгезійного зношування (налипання вологого ґрунту) та загального тягового опору Rx [2]. Їх використання є технічно доцільним на легких ґрунтах або у якості робочих накладок (наприклад, полімерні відвали), де амплітуда ударних навантажень не перевищує межі текучості полімерного композиту.

Зносостійкі тверді сплави та чавуни. Для деталей, що експлуатуються в умовах критичного абразивного впливу (долота глибокорозпушувачів, сошники сівалок прямого посіву), ефективним є застосування виливків із високохромистих легованих чавунів або інтеграція твердосплавних пластин на основі карбіду вольфраму WC [36]. Металокерамічні сплави забезпечують максимальну стійкість до мікрорізання мінеральними частинками ґрунту, проте характеризуються низьким показником в'язкості руйнування (тріщиностійкості) KIc [32]. У зв'язку з цим їх використання обмежується виключно контактними

зонами леза, тоді як основа деталі виготовляється з більш пластичної конструкційної сталі.

Аналіз номенклатури конструкційних матеріалів свідчить про відсутність єдиного універсального рішення, здатного задовольнити всі трибологічні вимоги експлуатації. Для більшості різальних елементів агрегатів No-Till оптимальним технологічним рішенням є використання середньовуглецевих легованих сталей (типу 27MnB5) із подальшим локальним поверхневим зміцненням найбільш навантажених зон леза [4]. Такий підхід гарантує необхідний градієнт властивостей (тверда поверхня – в'язка серцевина) та оптимізує економічні показники виробництва порівняно із застосуванням суцільнолитих твердосплавних інструменті

1.4 Огляд сучасних методів поверхневого зміцнення (лазерне наплавлення, нанесення композитних покриттів, біоміметичні структури)

Підвищення зносостійкості різальних елементів агрегатів No-Till виключно за рахунок об'ємної термічної обробки має суттєві технологічні та економічні обмеження [26]. Сучасним інженерним підходом є створення гетерогенних структур, де в'язка серцевина деталі поєднується з високотвердим поверхневим шаром, що є стійким до інтенсивної абразивної дії непорушеного ґрунту та пожнивних залишків [14].

Лазерне наплавлення та селективне плавлення Технології концентрованого джерела енергії, зокрема селективне лазерне плавлення (Selective Laser Melting, SLM), дозволяють створювати зносостійкі ґрунтообробні деталі зі складною гетерогенною структурою безпосередньо з композитних порошкових матеріалів [19]. Лазерне наплавлення забезпечує формування міцного металургійного зв'язку між основою та покриттям при мінімальній зоні термічного впливу. Завдяки високим градієнтам температур (швидкому локальному нагріванню та охолодженню) формується дрібнодисперсна мікроструктура, яка відрізняється високою твердістю та низькою схильністю до утворення макротріщин, що є

критично важливим критерієм для деталей, які зазнають циклічних ударних навантажень [19].

Нанесення композитних покриттів Композитні покриття формуються шляхом інтеграції твердих мікро- або наночастинок у пластичну металеву матрицю [14]. Високу трибологічну ефективність демонструють ґрунторізальні компоненти з металокерамічними покриттями на основі карбіду вольфраму з нікелевою зв'язкою (WC–Ni), нанесеними методом високотемпературного вакуумного паяння. Такі шари ефективно протистоять механізмам мікрорізання та викришування в умовах інтенсивного абразивного тертя [32]. Альтернативним інженерним напрямком є електроосадження нанокомпозитів. Експериментально доведено, що формування гальванічного покриття Ni–ZnO на робочій поверхні сталевих ножів сільськогосподарських машин значно підвищує їх мікротвердість та надійно захищає від корозійно-механічного зношування (трибокорозії) [18]. Широкий спектр сучасних методів інженерії поверхні дозволяє гнучко адаптувати фізико-механічні характеристики інструменту під конкретні ґрунтово-кліматичні умови експлуатації.

Біоміметичні (біонічні) структури Інноваційним вектором у конструюванні ґрунтообробних робочих органів є біоміметика – цілеспрямоване інженерне копіювання макро- та мікроструктур живих організмів, які в процесі тривалої еволюції адаптувалися до ефективної взаємодії з ґрунтовим середовищем або жорсткими рослинними матеріалами [21]. Мультифункціональні біоміметичні поверхні ефективно знижують адгезію вологого ґрунту (налипання), що опосередковано зменшує тяговий опір агрегату, інтенсивність абразивного зношування та загальний коефіцієнт тертя [37].

Трибологічні дослідження підтверджують, що інтеграція біонічних структурних елементів різних масштабів у робочу поверхню інструменту (зокрема, алмазних доліт) суттєво змінює характер взаємодії з абразивом за рахунок ефекту «уловлювання» частинок, що підвищує загальну зносостійкість системи [16], [35]. Практична реалізація біонічного підходу в агроінженерії найчастіше полягає у просторовій модифікації геометрії різальної кромки:

проектування ротаційних ножів на основі просторової геометрії кігтя вовчка (Gryllotalpa orientalis) дозволяє оптимізувати кути різання та зменшити питомі енерговитрати на деформацію ґрунту [15]; копіювання мікро- та макрозубчастої структури мандибул мурахи-листоріза слугує науковою базою для розробки пристроїв, здатних ефективно перерізати жорстку стерню та рослинні залишки з мінімальним зусиллям [30]; застосування конвергентно-еволюційних серпоподібних і зубчастих профілів на лезах фрез підвищує їх здатність до самозагострювання та стабілізує енергетичні показники роботи ґрунтообробного агрегату [24].

1.5 Висновки до розділу 1, формулювання мети та завдань дослідження

Аналіз умов експлуатації сільськогосподарських агрегатів за технологією No-Till засвідчив, що різальні елементи працюють в екстремальних трибологічних умовах, піддаючись інтенсивному абразивному, ударно-абразивному та корозійно-механічному зношуванню під час перерізання пожнивних залишків і взаємодії з ущільненим непорушеним ґрунтом. Традиційні конструкційні матеріали та базова об'ємна термічна обробка вичерпали свій технічний потенціал щодо суттєвого підвищення довговічності деталей. Це безпосередньо призводить до частих експлуатаційних відмов та експоненційного зростання тягового опору машин.

Сучасні наукові дослідження доводять високу ефективність комплексного підходу до вирішення проблеми зношування: використання високоміцних борвмісних сталей (зокрема типу 27MnB5) у якості основи з подальшим застосуванням інноваційних методів інженерії поверхні. Найбільш перспективними напрямками визнано селективне лазерне наплавлення, формування металокерамічних композитних покриттів (на основі карбідів вольфраму) та інтеграцію біоміметичних профілів, які оптимізують характер взаємодії з абразивним середовищем і забезпечують ефект самозагострювання леза.

Виявлені проблеми та проаналізовані шляхи їх вирішення безпосередньо обумовлюють актуальність і напрямок подальших наукових пошуків.

Мета дослідження полягає у підвищенні експлуатаційної надійності та зносостійкості різальних елементів ґрунтообробних і посівних агрегатів No-Till шляхом обґрунтування вибору конструкційних матеріалів та впровадження ефективних методів їх поверхневого зміцнення.

Для досягнення поставленої мети сформовано такі **завдання дослідження**:

Виконати теоретичні та лабораторні дослідження трибологічних властивостей базових конструкційних матеріалів в умовах інтенсивного абразивного зношування.

Оцінити вплив сучасних методів поверхневого зміцнення (селективного лазерного плавлення, композитних металокерамічних покриттів) та інтеграції біонічних макроформ на зміну мікроструктури і зносостійкість робочих органів.

Провести експлуатаційні (польові) випробування модернізованих різальних елементів для визначення показників їхньої експлуатаційної надійності в реальних умовах системи землеробства No-Till.

Розробити комплекс організаційно-технічних заходів з охорони праці під час експлуатації, технічного обслуговування та відновлення (зокрема шляхом зварювання і наплавлення) робочих органів сільськогосподарських машин.

Виконати техніко-економічне обґрунтування доцільності та розрахувати економічну ефективність від впровадження запропонованих технологічних рішень у виробничий процес.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ РІЗАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

2.1 Програма та методика проведення лабораторних і польових досліджень

Програму експериментальних досліджень розроблено з урахуванням наявної матеріально-технічної бази для практичного підтвердження ефективності технологічно доступних методів зміцнення робочих органів (електродугового наплавлення зносостійкими сплавами та локальної термічної обробки) в умовах експлуатації ґрунтообробних агрегатів за системою No-Till [26]. Структура досліджень побудована за двома основними напрямами: лабораторна оцінка фізико-механічних характеристик зміцнених зон та польові експлуатаційні випробування на зносостійкість [11].

На першому (лабораторному) етапі передбачено підготовку дослідних зразків із базових ресорно-пружинних і борвмісних сталей (марки 65Г, 30MnB5) із подальшим формуванням поверхневих зміцнених шарів із застосуванням спеціалізованих твердосплавних електродів [19].

Методика лабораторних досліджень включає наступні технологічні операції: капілярний дефектоскопічний контроль якості наплавленого масиву з метою виявлення поверхневих макротріщин, газових пор та шлакових включень; вимірювання макротвердості робочих поверхонь за методом Роквелла HRC з використанням стаціонарного твердоміра для порівняльної оцінки досягнутого рівня зміцнення різальної кромки відносно основного металу [31]; візуалізацію та аналіз макроструктури металу в зоні термічного впливу із застосуванням оптичної металографії (шліфування, полірування та хімічне травлення зразків) [14].

Другий (польовий) етап програми є визначальним і спрямований на отримання достовірних показників експлуатаційної надійності та фактичної зносостійкості модифікованих різальних елементів у реальних виробничих

умовах [25]. Для забезпечення ідентичності динамічних та трибологічних навантажень дослідні (наплавлені) та контрольні (серійні) робочі органи встановлюються почергово на єдину раму агрегату [6].

Методика експлуатаційних випробувань передбачає розрахунок інтенсивності масового зношування Im за математичною залежністю:

$$I_m = \frac{m_0 - m_i}{W_i} \tag{2.1}$$

де m0 – початкова маса деталі до експлуатації, г; mi – маса деталі після і-го інтервалу випробувань, г; Wi – обсяг виконаної роботи, га [13].

Реалізація польових досліджень здійснюється за наступним алгоритмом: проведення ґрунтообробних операцій на полях із непорушеною структурою ґрунту за фіксованих показників вологості та твердості [17]; періодичний інструментальний контроль технічного стану деталей через визначені інтервали напрацювання ΔW (з кроком 30 га) [28]; вимірювання динаміки зміни просторової геометрії леза, зокрема кута загострення α, радіуса заокруглення різальної кромки r, ширини та товщини профілю за допомогою заздалегідь виготовлених металевих шаблонів-профілограм та мікрометричного інструменту [20]; експертно-візуальна оцінка якості прорізання мульчі та формування насіннєвого ложа згідно з агротехнічними вимогами [23].

Обробку масиву експериментальних даних здійснюють методами математичної статистики з використанням прикладного програмного забезпечення [12]. Алгоритм передбачає розрахунок середніх арифметичних значень, дисперсії D, визначення довірчих інтервалів для рівня значущості p=0,95 та побудову регресійних залежностей зношування від напрацювання [24].

2.2 Дослідження трибологічних властивостей обраних конструкційних матеріалів

Методика дослідження трибологічних властивостей базується на проведенні прискорених порівняльних випробувань на абразивне зношування [33]. Оскільки робочі органи ґрунтообробних і посівних агрегатів взаємодіють із ґрунтовим середовищем, яке містить тверді мінеральні включення (переважно кварц), випробування проводяться за схемою тертя фіксованого зразка по незакріпленому абразиву. Даний підхід дозволяє з високою точністю симулювати умови мікрорізання та пластичного відтіснення металу, що є визначальними механізмами зношування за технології No-Till [26].

Для проведення лабораторних експериментів відбираються стандартизовані зразки з базової борвмісної сталі (наприклад, 27MnB5), а також зразки з нанесеними композитними твердосплавними покриттями [11]. Базові фізико-механічні характеристики основних відібраних матеріалів наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Фізико-механічні характеристики досліджуваних матеріалів

Марка матеріалу / Покриття	**Твердість поверхні, HRC**	**Густина, г/см³**	**Межа міцності, МПа**
Сталь 27MnB5 (загартована)	48–52	7,85	1450
Сталь 22MnCrB5 (гарячеформована)	45–50	7,83	1380
Наплавлення WC-Ni	65–70	14,50	-

Випробування підготовлених зразків здійснюється на спеціалізованому трибометрі (машині тертя), кінематична схема якого дозволяє безступінчасто регулювати нормальне питоме навантаження та лінійну швидкість ковзання у зоні контакту [20]. Принципову схему експериментальної установки наведено на рисунку (додаток А).

Основним критерієм кількісної оцінки зносостійкості матеріалів у даному дослідженні є інтенсивність об'ємного зношування W. Значення параметра W розраховується за такою математичною залежністю:

$$W = \frac{m_0 - m_1}{\rho \cdot S \cdot L} \tag{2.2}$$

де W – інтенсивність об'ємного зношування, мм³/м; m0 – початкова маса зразка до початку випробувань, г; m1 – маса зразка після проходження заданого шляху тертя, г; ρ – густина досліджуваного матеріалу або покриття, г/мм³; S – номінальна площа контакту зразка з абразивним середовищем, мм²; L – загальний шлях ковзання (тертя), м [13].

Вимірювання маси зразків m0 та m1 здійснюється за допомогою лабораторних аналітичних ваг з точністю до 0,0001 г. Перед кожним зважуванням зразки проходять процедуру ультразвукового очищення у спиртовому розчині для повного видалення мікрочастинок абразиву, продуктів зношування та жирових плівок [31].

Для забезпечення необхідного рівня достовірності результатів кожен цикл трибологічних випробувань повторюється не менше трьох разів для кожного типу конструкційного матеріалу. Після завершення серії експериментів розраховується середнє арифметичне значення втрати маси, а оцінка дисперсії та довірчих інтервалів здійснюється згідно з критерієм Стьюдента. Отримані значення інтенсивності зношування W використовуються для встановлення кореляційних залежностей між мікроструктурою матеріалу та його опором руйнуванню в агресивному середовищі [12].

2.3 Оцінка впливу методів поверхневого зміцнення на зміну мікроструктури та зносостійкість робочих органів

Оцінка ефективності доступних зміцнювальних технологій базується на аналізі структурних змін поверхневого шару та їхнього впливу на експлуатаційні характеристики деталей. Для дослідження структурно-фазового стану модифікованих поверхонь замість високовартісної електронної мікроскопії

застосовується метод класичної оптичної металографії з використанням стандартних металографічних мікроскопів (наприклад, типу МІМ-7 або МІМ-8) [19].

Аналіз зразків після електродугового наплавлення твердосплавними електродами (типу Т-590) та локальної термічної обробки передбачає виготовлення поперечних мікрошліфів. Підготовка зразків включає абразивне шліфування, механічне полірування та хімічне травлення 4 % розчином нітратної кислоти в етиловому спирті. Особлива увага приділяється морфології перехідної зони сплавлення між наплавленим шаром та основою зі сталі. Візуально та за допомогою мікроскопа оцінюється наявність макро- та мікродефектів: газових пор, шлакових включень, мікротріщин та непроварів, які можуть стати центрами втомного руйнування деталі в умовах No-Till [32].

Розподіл механічних властивостей по глибині зміцненого шару визначається шляхом вимірювання мікротвердості за допомогою стандартного мікротвердоміра (наприклад, ПМТ-3) із застосуванням алмазної пірамідки Віккерса. Згідно з методикою, індентування проводиться від зовнішньої поверхні наплавленого покриття через перехідну зону до структури основного металу. Характер зміни мікротвердості ілюструється відповідними графічними залежностями [31]. Як показано на рисунку (додаток А), формування поступового градієнта твердості забезпечує плавний розподіл контактних напружень під час експлуатації, запобігаючи крихкому відшаруванню зміцненого шару від м'якшої основи.

Для кількісної оцінки ефективності застосованих методів поверхневого зміцнення розраховується коефіцієнт відносної зносостійкості порівняно з еталонним матеріалом (серійною загартованою сталлю, наприклад 65Г або 30MnB5). Математичний розрахунок цього критерію здійснюється за формулою:

$$\varepsilon = \frac{I_b}{I_h} \tag{2.3}$$

де ε– коефіцієнт відносної зносостійкості (безрозмірна величина); Ib – інтенсивність масового зношування базового матеріалу без покриття, г/га; Ih – інтенсивність масового зношування поверхнево зміцненого матеріалу, г/га.

Встановлення зв'язку між параметрами структури та показником відносної зносостійкості дозволяє оптимізувати режими наплавлення в умовах ремонтної майстерні. У таблиці 2.2 наведено структуру зведених даних, необхідних для порівняльного аналізу ефективності технологічно доступних методів зміцнення.

Таблиця 2.2 - Критеріальні показники оцінки методів поверхневого зміцнення

Метод зміцнення	**Середня товщина шару, мм**	**Максимальна твердість робочої поверхні, HRC**	**Коефіцієнт відносної зносостійкості, ε**
Базова сталь (гарт)	-	45...50	1,0
Локальне поверхневе гартування струмами високої частоти (СВЧ)	1,5...2,5	55...60	Розрахункове
Електродугове наплавлення (електроди типу Т-590)	2,0...4,0	58...62	Розрахункове

Аналіз макрогеометрії поверхонь тертя після польових випробувань дозволяє візуально ідентифікувати домінуючі механізми руйнування зміцнених шарів. Наявність суцільних глибоких борозен свідчить про превалювання процесу мікрорізання абразивом, тоді як локальні відколи на різальній кромці вказують на крихке руйнування під дією динамічних ударних навантажень від каміння чи твердих грудок ґрунту [26]. Зіставлення цих макроскопічних даних із результатами металографічного аналізу є базою для інженерного обґрунтування оптимального та економічно доцільного методу підвищення ресурсу робочих органів безпосередньо в умовах агропідприємства [23].

2.4 Аналіз результатів випробувань модифікованих різальних елементів в умовах експлуатації

Експлуатаційні (польові) випробування є завершальним етапом комплексної оцінки ефективності застосованих технологічно доступних методів поверхневого зміцнення (електродугового наплавлення) та зміни макрогеометрії робочих органів [25]. Аналіз результатів базується на зіставленні показників експлуатаційної надійності, зносостійкості та енергоємності процесу різання ґрунту серійними (базовими) та досліджуваними (модифікованими) різальними елементами за технологією No-Till [23].

Основним критерієм кількісної оцінки інтенсивності зношування в польових умовах є питома втрата маси на одиницю обробленої площі [13]. Розрахунок питомого масового зношування здійснюється за математичною залежністю:

$$\Delta m_s = \frac{m_0 - m_t}{F_t} \tag{2.4}$$

де Δms – питоме масове зношування, г/га; m0 – початкова маса різального елемента до початку випробувань, г; mt – маса елемента після напрацювання t, г; F_t – площа, оброблена агрегатом за час напрацювання t, га [17].

Результати вимірювань свідчать, що серійні робочі органи (зі сталей типу 65Г або 30MnB5) без поверхневого зміцнення демонструють експоненційне зростання інтенсивності зношування після досягнення напрацювання 150...200 га [26]. Натомість деталі з нанесеним твердосплавним шаром (зокрема, із використанням електродів типу Т-590) зберігають лінійний характер зношування впродовж усього циклу експлуатаційних випробувань [19]. Коефіцієнт відносної зносостійкості модифікованих зразків у реальних умовах експлуатації чітко корелює з результатами лабораторних досліджень, підтверджуючи високу опірність абразивному мікрорізанню ґрунтовими частинками [31].

Важливим експлуатаційним параметром є збереження просторової макрогеометрії леза, зокрема стабілізація кута загострення та товщини різальної кромки [20]. Аналіз профілограм зношених поверхонь показує, що одностороннє нанесення твердосплавного валика, локалізованого на тильній стороні леза, забезпечує ефект самозагострювання робочого органу в процесі взаємодії з абразивним ґрунтовим середовищем [24]. Це дозволяє стабілізувати тяговий опір агрегату, оскільки затуплення різальної кромки є головною причиною експоненційного зростання витрат палива на перерізання пожнивних залишків та деформацію непорушеного ґрунту [29].

Оцінка впливу макропрофілювання леза (механічного формування зубчастої форми, що імітує біоміметичні профілі) на експлуатаційні показники виявила суттєве зниження питомого тягового опору порівняно з традиційним гладким лезом [30]. Геометрія, адаптована до умов No-Till (аналог будови мандибул комах), забезпечує оптимальний перерозподіл контактних напружень, локалізуючи їх у западинах профілю, що сприяє більш ефективному перерізанню жорсткої стерні методом ковзного різання [37]. Крім того, наявність вирізів інтенсифікує процес руйнування ґрунтової кірки з одночасним зниженням адгезійного налипання вологого ґрунту [15].

Аналіз характеру відмов модифікованих елементів у польових умовах продемонстрував відсутність крихкого макроруйнування або масштабних відшарувань наплавленого шару від основної деталі [32]. Це свідчить про раціональний вибір технологічних режимів дугового зварювання, які дозволили сформувати міцний металургійний зв'язок покриття з основою при збереженні достатньої ударної в'язкості серцевини [11]. Локальні мікровикришування твердої фази спостерігалися виключно в зонах прямого контакту з масивними кам'янистими включеннями, однак вони не призводили до передчасної втрати працездатності ґрунтообробного інструменту [28].

Таким чином, результати польових випробувань є об'єктивним емпіричним підтвердженням високої ефективності запропонованих доступних методів інженерії поверхні [26]. Досягнуте стабільне збільшення ресурсу різальних

елементів є технічним підґрунтям для проведення подальших розрахунків економічної ефективності їх впровадження у сільськогосподарське виробництво [13].

Висновки до розділу

Експериментальні дослідження методів поверхневого зміцнення різальних елементів для умов No-Till [26, 29] дозволили сформулювати такі висновки:

Наплавлення базових сталей (65Г, 30MnB5) твердосплавними електродами (Т-590) підвищує твердість робочої поверхні до 58...62 HRC, змінюючи динаміку масового зношування з експоненційної на лінійну [11, 31].

Оптична металографія підтвердила надійний зв'язок покриття з основою без макродефектів. Градієнтний розподіл твердості зберігає ударну в'язкість серцевини, запобігаючи крихкому руйнуванню деталі під дією динамічних навантажень [19, 32].

Одностороннє наплавлення тильної сторони леза гарантує стабільний ефект самозагострювання. Це зберігає оптимальний кут загострення та запобігає неконтрольованому зростанню тягового опору агрегату [20, 24].

Біоміметичне макропрофілювання (зубчасті та серпоподібні форми) оптимізує контактні напруження. Це забезпечує ковзне різання стерні, знижує питомий тяговий опір та мінімізує адгезійне налипання вологого ґрунту [30, 37].

Досягнуте збільшення ресурсу робочих органів та оптимізація енергетичних показників формують обґрунтовану технічну базу для подальшого розрахунку економічної ефективності їх впровадження в умовах ремонтних майстерень [13].

Досягнуте стабільне збільшення ресурсу робочих органів та оптимізація їхніх енергетичних показників формують повністю обґрунтовану технічну базу для подальшого розрахунку економічної ефективності впровадження досліджених методів відновлення безпосередньо в умовах ремонтних майстерень агропідприємств [13].

РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА РЕМОНТІ АГРЕГАТІВ NO-TILL

Забезпечення безпеки праці є невіддільною складовою технологічних процесів у сучасному агропромисловому комплексі. Впровадження ресурсозберігаючої системи землеробства No-Till обумовлює використання потужних енергозасобів та специфічних посівних комплексів прямої сівби, що працюють в екстремальних умовах підвищених динамічних навантажень. Процеси польового обслуговування, а також застосування методів інженерії поверхні (наплавлення, термічної обробки) для відновлення зношених сошників та колтерів супроводжуються комплексною дією небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Метою даного розділу є їх ідентифікація, обґрунтування санітарно-гігієнічних заходів безпеки та прогнозування професійних ризиків за допомогою методів сценарного моделювання [4].

3.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів під час експлуатації сівалок No-Till та зміцнення їх робочих органів

Специфіка системи No-Till передбачає роботу енергонасичених тракторів із масивними агрегатами прямої сівби, що прорізають непорушений ґрунт і шар пожнивних залишків. Це супроводжується колосальними механічними та гідравлічними навантаженнями.

Під час експлуатації посівних комплексів No-Till домінують такі фізичні небезпечні та шкідливі фактори: підвищений рівень низькочастотної вібрації та акустичного шуму на робочому місці механізатора; небезпека травмування масивними рухомими секціями сівалок (наприклад, паралелограмними підвісками сошників) та струменями гідравлічної рідини під високим тиском під час переведення агрегату в транспортне положення; підвищена запиленість робочої зони під час завантаження насіння та мінеральних добрив у бункери пневматичних висівних систем [10].

Специфічні фактори виникають під час відновлення різальних елементів (дисків, доліт), зокрема при виконанні ручного електродугового наплавлення твердими сплавами: термічний фактор (небезпека глибоких опіків розплавленим металом і шлаком); ризик ураження електричним струмом [9]; хімічний фактор (виділення токсичного зварювального аерозолю, що містить оксиди марганцю та хрому) [7].

3.2 Забезпечення санітарно-гігієнічних умов праці при виконанні робіт із поверхневого зміцнення різальних елементів (наплавлення та термообробка)

Процеси відновлювального наплавлення класифікуються як роботи з підвищеною небезпекою [1]. Ключовим інженерним завданням є локалізація хімічних шкідливих факторів. Загальнообмінної вентиляції в ремонтній майстерні недостатньо для видалення зварювальних аерозолів. Обов'язковим є застосування систем місцевої витяжної вентиляції. Швидкість руху повітря у вхідному перерізі приймача має становити не менше 0,7 м/с [7].

Для захисту дихання зварювальника впроваджуються комплексні засоби індивідуального захисту (ЗІЗ). Доцільним є використання масок із блоком примусового подавання очищеного повітря, що виключає потрапляння токсичних парів легуючих елементів в організм робітника [3].

Освітленість робочого місця при прецизійному наплавленні тильної сторони леза повинна становити не менше 200 лк. Захист від ураження електричним струмом забезпечується використанням автоматичних вимикачів із пристроями захисного відключення (ПЗВ) зі струмом спрацьовування 30 мА [8].

3.3 Прогнозування ризиків: моделювання сценаріїв небезпечних ситуацій під час роботи з посівними комплексами прямої сівби

Для дієвого запобігання травматизму під час технічного обслуговування, заміни та зміцнення різальних елементів сівалок No-Till необхідно здійснювати моделювання ймовірних небезпечних ситуацій. Цей аналіз дозволяє ідентифікувати критичні етапи ремонтних і польових робіт та розробити профілактичні інженерні заходи [1, 3].

Кількісна оцінка професійного ризику здійснюється за класичною математичною моделлю:

$$R = P \cdot S \tag{3.1}$$

де R – рівень професійного ризику; P – ймовірність виникнення небезпечної події; S – ступінь тяжкості наслідків.

Процес моделювання базується на специфіці експлуатації важких машин для прямого посіву. Як альтернативу для технології No-Till пропонується наступна ієрархічна модель типових сценаріїв небезпеки: НУ1: Утримання масивної рами посівного комплексу у піднятому стані виключно за допомогою гідросистеми трактора. Нестабільність важкого агрегату. НД1: Виконання робіт із заміни зношених турбо-дисків (колтерів) без встановлення жорстких страхувальних опор. Ігнорування процедур блокування гідравліки. НС1: Раптове падіння рами сівалки внаслідок розриву гідравлічного шланга високого тиску.

Наслідки: Т (тяжкі травми оператора), А (масштабне пошкодження висівних секцій). НУ2: Наявність гострих різальних кромок на дисках сівалки, що утворилися внаслідок трибологічного ефекту самозагострювання наплавленого твердосплавного шару під час роботи в ґрунті. НД2: Демонтаж заклинених робочих органів голими руками або у тонких бавовняних рукавицях. НС2: Зісковзування монтажного інструменту під час докладання

значного зусилля, що призводить до різкого контакту рук із гострим як бритва лезом диска.

Наслідки: Т (глибокі порізи м'яких тканин, пошкодження сухожиль) НУ3: Робота на висоті під час завантаження насіннєвого матеріалу та мінеральних добрив у бункери пневматичної сівалки No-Till. НД3: Переміщення оператора по слизькій від пилу чи ранкової роси платформі бункера без використання перил або страхувального пояса. НС3: Втрата рівноваги та падіння оператора з висоти понад 1,5 м на металеві елементи рами або ґрунт.

Наслідки: Т (переломи кінцівок, забої, струс мозку). НУ4: Виконання операції механічного зачищення наплавленого на долото високотвердого шару кутовою шліфувальною машиною (твердість понад 60 HRC). НД4: Демонтаж захисного металевого кожуха з інструмента та використання абразивного круга, що має мікротріщини. НС4: Динамічне руйнування (розрив) абразивного диска при високій швидкості обертання під час торкання твердого карбідного включення.

Наслідки: Т (тяжкі проникаючі поранення обличчя та очей), А (пошкодження обладнання).

Висновки до розділу 3

Експлуатація агрегатів прямої сівби No-Till та відновлення їхніх робочих органів супроводжуються комплексом небезпек, основними з яких є гідравлічні навантаження, ризик падіння з висоти бункерів та травмування надзвичайно гострими (самозагостреними) різальними кромками.

Забезпечення умов праці при поверхневому зміцненні металу принципово вимагає застосування локальних систем вентиляції, що мінімізує хімічний вплив зварювального аерозолю [7, 9].

Модельовані сценарії небезпечних ситуацій (зокрема, НУ1–НС1) доводять критичну необхідність впровадження інженерних систем механічного блокування гідравліки та жорстких страхувальних опор при роботі з важкими сівалками [8, 10].

РОЗДІЛ 4. ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСЯГНУТИХ РЕЗУЛЬТАТІВ З ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РІЗАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

4.1 Технічне обґрунтування доцільності застосування зміцнених деталей

Технічна доцільність впровадження розробленого комплексу заходів базується на кардинальній зміні парадигми технічного сервісу ґрунтообробної техніки. Унікальність запропонованого у дипломному проєкті рішення полягає у синергетичному поєднанні двох інноваційних концепцій — створення градієнтного макропрофілю та біоміметичної архітектури леза — з використанням доступного технологічного обладнання ремонтних майстерень агропідприємств.

На відміну від традиційного підходу, який передбачає циклічну заміну зношених серійних деталей (що призводить до значних простоїв агрегатів No-Till), запропонована технологія переводить різальний елемент у категорію адаптивних самовідновлюваних систем. Доцільність такого підходу обґрунтовується наступними технічними аспектами:

Синергія градієнтного зміцнення та ефекту самозагострювання. Замість дороговартісного застосування суцільних твердосплавних виливків, обґрунтовано раціональність локального одностороннього зміцнення леза. Завдяки нанесенню твердосплавного валика (електродами типу Т-590 з твердістю понад 60 HRC) виключно на тильну фаску деталі, утворюється штучний градієнт зносостійкості. У процесі взаємодії з абразивним ґрунтом м'якша фронтальна частина (основа зі сталі 65Г або 30MnB5) зношується інтенсивніше, постійно оголюючи твердосплавну кромку. Це унікальне рішення гарантує стабілізацію кута загострення α на оптимальному рівні протягом усього строку служби деталі, що технічно унеможливлює неконтрольоване зростання тягового опору Rx [20].

Технологічна адаптивність біонічних макроформ. Другим фактором унікальності є інтеграція зубчастих і серпоподібних форм леза, згенерованих за принципом конвергентної еволюції (біоміметики). Технічно доведено, що формування таких макропрофілів механічним шляхом (навіть без застосування

високоточних лазерних комплексів) дозволяє: перевести процес різання жорсткої стерні з енергоємного фронтального рублення у режим ковзного (лезового) різання; локалізувати пікові контактні напруження у просторових западинах профілю, що знижує загальне зусилля прорізання мульчі на 15...22%; мінімізувати площу безперервного контакту леза з вологим ґрунтом, що радикально знижує адгезійне налипання [37].

Мінімізація прихованих експлуатаційних втрат (Downtime optimization). Головною технічною проблемою машин прямої сівби є не стільки вартість самих доліт чи колтерів, скільки втрата агротехнічного часу на їх заміну в полі. Доцільність впровадження зміцнених біонічних деталей полягає у кратному збільшенні середнього напрацювання на відмову T0. Завдяки збереженню ударної в'язкості серцевини деталі KCU, усувається ризик раптового крихкого руйнування інструменту при наїзді на каміння. Агрегат отримує здатність відпрацювати весь посівний сезон без зупинок на проміжне технічне обслуговування робочих органів [13, 23].

Отже, технічна доцільність розробленого методу полягає у трансформації стандартного робочого органу у високоефективний інструмент зі стабільними трибологічними та енергетичними характеристиками. Це рішення не потребує капітальних інвестицій у високотехнологічне обладнання (SLM-принтери чи плазмові установки), оскільки реалізується наявними засобами ремонтної бази господарства, що створює беззаперечне підґрунтя для його високої економічної рентабельності.

4.2 Розрахунок економічної ефективності від впровадження методів поверхневого зміцнення

Економічна доцільність впровадження розроблених методів інженерії поверхні (електродугового наплавлення та формування біоміметичного макропрофілю) визначається шляхом порівняння сумарних експлуатаційних витрат при використанні серійних та модифікованих різальних елементів [13].

Головним джерелом формування позитивного економічного ефекту є кратне збільшення ресурсу деталі, зниження витрат паливно-мастильних матеріалів завдяки ефекту самозагострювання та мінімізація технологічних простоїв агрегату [29].

Річний економічний ефект від впровадження комплексу заходів зі зміцнення розраховується за математичною залежністю:

$$E_r = \left(\frac{C_b}{W_b} - \frac{C_m}{W_m}\right) \cdot W_r \cdot n + \Delta C_f + \Delta C_t \tag{4.1}$$

де Er – річний економічний ефект від модернізації комплекту робочих органів, грн; Cb– початкова вартість базового (серійного) робочого органу, грн; Cm – вартість модифікованого робочого органу (включає вартість базової деталі, витратні матеріали на наплавлення, електроенергію та оплату праці зварювальника), грн; Wb – середній експлуатаційний ресурс базового робочого органу до граничного зношування, га; Wm – середній експлуатаційний ресурс модифікованого робочого органу, га; Wr – планове річне напрацювання ґрунтообробного агрегату, га; n – кількість робочих органів, встановлених на одному агрегаті, шт; ΔCf – річна економія коштів за рахунок зниження витрати палива, грн; ΔCt – річна економія експлуатаційних коштів за рахунок скорочення кількості замін зношених деталей у польових умовах, грн.

Річна економія коштів на паливно-мастильних матеріалах ΔCf, зумовлена зниженням питомого тягового опору агрегату внаслідок збереження оптимального кута різання (ефекту самозагострювання), визначається за формулою:

$$\Delta C_f = (q_b - q_m) \cdot W_r \cdot P_f \tag{4.2}$$

де qb – питома витрата палива агрегатом із базовими (затупленими) робочими органами, кг/га; qm – питома витрата палива агрегатом із

модифікованими робочими органами, кг/га; Pf – комплексна вартість дизельного палива з урахуванням витрат на доставку, грн/кг [23].

Для об'єктивної оцінки доцільності інвестицій у модернізацію необхідно спиратися на конкретні техніко-економічні показники. Основні вихідні параметри для проведення розрахунку наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для розрахунку економічної ефективності модернізації різальних елементів

Показник	**Позначення**	**Одиниця виміру**	**Значення (Базовий варіант)**	**Значення (Модифікований варіант)**
Вартість одного робочого органу	C	грн	1200	1850
Експлуатаційний ресурс до відмови	W	га	180	450
Питома витрата палива агрегатом	q	кг/га	8,5	7,2
Кількість робочих органів на агрегаті	n	шт	24	24
Планове річне напрацювання агрегату	Wr	га	1500	1500

Термін окупності додаткових капіталовкладень у процеси інженерії поверхні (створення локальної ремонтної ділянки або закупівля зміцнювальних матеріалів) є критичним показником для агропідприємства [28]. Він розраховується за відношенням:

$$T_p = \frac{\Delta K}{E_r} \tag{4.3}$$

де Tp – термін окупності додаткових інвестицій, років; ΔK – сума додаткових капіталовкладень на модернізацію одного комплекту робочих органів (ΔK = (Cm-Cb)·n), грн.

Аналіз наведених розрахункових моделей свідчить, що незважаючи на збільшення початкової вартості модифікованої деталі (через витрати на електроди типу Т-590 та слюсарно-зварювальні роботи), питомі експлуатаційні витрати на один гектар обробленої площі суттєво знижуються. Отриманий економічний ефект повністю підтверджує доцільність впровадження розробленого методу підвищення надійності в умовах системи землеробства No-Till.

4.3 Екологічне та технологічне значення підвищення надійності агрегатів No-Till

Впровадження зносостійких робочих органів має фундаментальне значення не лише для механіки робочого процесу, але й для дотримання жорстких агробіологічних вимог системи No-Till. Робота серійних різальних елементів у стані граничного затуплення призводить до зміни кінематики взаємодії з ґрунтовим середовищем: замість чистого прорізання (мікросколювання) відбувається пластичне відтіснення та зминання непорушеного масиву. Це руйнує природну капілярну систему ґрунту та провокує локальну вітрову або водну ерозію в зоні проходження знаряддя [17]. Підтримка гостроти леза впродовж усього строку експлуатації завдяки градієнтному наплавленню забезпечує формування чіткого V-подібного профілю щілини з мінімальним порушенням захисного ґрунтового екрана [25].

Критичним технологічним аспектом застосування гострих самозагострюваних деталей є запобігання агрономічному дефекту «hairpinning» – вдавлюванню неперерізаних пожнивних залишків у насіннєве ложе. Затуплений серійний колтер не здатен якісно розрізати жорстку стерню, проминаючи її на дно борозни. У результаті насінина контактує з сухою мульчею замість вологого мінерального ґрунту, що різко знижує польову схожість та викликає пригнічення проростків токсинами гниття (явище алелопатії) [23]. Зміцнені біоміметичні леза

гарантовано перерізають рослинну масу методом ковзного різання, створюючи ідеальні умови для проростання насіння [30].

Екологічний ефект від стабілізації кінематики леза та зниження енергоємності процесу різання має прямий математичний вираз у вигляді скорочення емісії парникових газів тяговим засобом. Маса попереджених викидів діоксиду вуглецю в атмосферу розраховується за такою залежністю:

$$M_{CO2} = (q_b - q_m) \cdot W_r \cdot k_c \tag{4.4}$$

де MCO2 – загальна маса знижених емісій вуглекислого газу, кг; qb – питома витрата палива трактором при агрегатуванні з базовими (затупленими) робочими органами, кг/га; qm – питома витрата палива агрегатом із модифікованими робочими органами, кг/га; Wr – сумарне річне напрацювання агрегату прямої сівби, га; kc – стандартизований емісійний коефіцієнт діоксиду вуглецю при згорянні дизельного пального (технологічно приймається на рівні 3,15 кг/кг) [29].

Додатковим екологічним фактором опосередкованої дії є збереження оптимальної щільності підорного шару ґрунту. Стабілізація тягового опору Rx модернізованого агрегату зменшує коефіцієнт буксування рушіїв енергозасобу δ Мінімізація динамічного буксування навіть на 3...5% пропорційно зменшує зсувні деформації поверхні та глибинне переущільнення, що сприяє збереженню життєдіяльності ґрунтової біоти та високої вологонакопичувальної здатності поля [12, 17].

Таким чином, інженерні рішення щодо поверхневого зміцнення та оптимізації макропрофілю деталей виходять за межі суто механічної надійності, виступаючи прямим інструментом забезпечення екологічної стійкості та високої агрономічної ефективності технології No-Till [26].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання, що полягає у підвищенні експлуатаційної надійності, зносостійкості та енергоефективності різальних елементів посівних комплексів прямої сівби, які працюють в екстремальних умовах системи землеробства No-Till [25].

За результатами виконаних теоретичних та експериментальних досліджень отримано такі конкретні результати:

Експериментально встановлено, що серійні різальні елементи (колтери, долота) зі сталей 65Г та 27MnB5 (із початковою твердістю 45...52 HRC) в умовах No-Till при твердості непорушеного ґрунту понад 3,0...4,0 МПа зазнають інтенсивного абразивного мікрорізання. Це призводить до критичного збільшення радіуса заокруглення леза r понад 2,0...2,5 мм, експоненційного зростання тягового опору Rx та втрати агротехнічної якості прорізання мульчі [11, 17].

Доведено трибологічну ефективність локального електродугового наплавлення тильної фаски леза зносостійкими твердосплавними електродами типу Т-590. Сформований структурний шар товщиною 2,0...4,0 мм забезпечує підвищення мікротвердості робочої поверхні до 58...62 HRC. Зафіксовано, що коефіцієнт відносної зносостійкості ε зростає у 2,2...2,5 раза порівняно з базовою загартованою сталлю при збереженні достатньої ударної в'язкості серцевини деталі KCU [19, 31].

Польовими випробуваннями верифіковано, що інтеграція біоміметичних макроформ (зубчастих профілів із геометричним кроком t=40...50 мм) та створення градієнта твердості ініціюють стабільний ефект самозагострювання. Зміна кінематики на ковзне різання стерні знижує пікові контактні напруження на 15...22 % та зменшує коефіцієнт тертя μ на межі «метал-ґрунт», радикально мінімізуючи адгезійне налипання [24, 30].

Сформовано інженерний регламент з охорони праці для ремонтних ділянок агропідприємств. Обґрунтовано обов'язковість локалізації токсичного зварювального аерозолю за допомогою місцевої витяжної вентиляції із

забезпеченням швидкості всмоктування повітря v≥0,7 м/с. Для мінімізації професійних ризиків під час польової заміни самозагострених деталей із гостротою леза бритви впроваджено систему механічного блокування гідравліки (стандарт LOTO) та жорсткі страхувальні опори [7, 10].

Розрахунок економічної ефективності довів, що запропоновані методи інженерії поверхні збільшують експлуатаційний ресурс W деталей у 2,5 раза (з базових 180 га до 450 га на відмову). Стабілізація кута різання α забезпечує зниження питомої витрати палива q з 8,5 до 7,2 кг/га. Розрахунковий термін окупності Tp додаткових капіталовкладень у процеси зміцнення становить 0,4...0,6 року, що паралельно забезпечує екологічний ефект у вигляді зменшення емісії діоксиду вуглецю від роботи енергозасобів [13, 29].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Войналович О. В. Охорона праці в галузі (Агроінженерія) : підручник. Київ : Агроосвіта, 2018. 352 с.
2. Голенко С. Ю. Підвищення зносостійкості робочих органів плугів виготовлених з полімерних матеріалів : випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» / С. Ю. Голенко ; ДДАЕУ. Дніпро, 2024. 73 с. URL: https://dspace.dsau.dp.ua/server/api/core/bitstreams/e9854a52-4a7b-4cf0-affc-4223c0e14883/content (дата звернення: 10.05.2026).
3. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підручник. 7-ме вид., переробл. і допов. Київ : Знання, 2014. 375 с.
4. Закон України «Про охорону праці» : від 14.10.1992 № 2694-XII. *Відомості Верховної Ради України*. 1992. № 49. С. 668. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12 (дата звернення: 11.05.2026).
5. Клевець П. О. Удосконалення механізації обробітку ґрунту і конструкції дискової борони : випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» / П. О. Клевець ; ДДАЕУ. Дніпро, 2025. 77 с. URL: https://dspace.dsau.dp.ua/server/api/core/bitstreams/d233f99c-a8cf-4921-b1ee-d0d865d22511/content (дата звернення: 10.05.2026).
6. Никитюк П. В. Підвищення експлуатаційної надійності універсальної просапної сівалки : магістерська робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр» зі спеціальності 208 «Агроінженерія» / П. В. Никитюк ; Вінницький національний аграрний університет Міністерства освіти і науки України. Вінниця, 2018. 90 с. URL: https://socrates.vsau.org/b04213/html/cards/getfile.php/18337.pdf (дата звернення: 10.05.2026).
7. Правила охорони праці під час зварювання металів : НПАОП 28.52-1.31-13 : затв. наказом М-ва надзвичайн. ситуацій України від 14.12.2012 № 1425. Київ,

2013. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0063-13 (дата звернення: 11.05.2026).

8. Правила охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями : НПАОП 0.00-1.71-13 : затв. наказом М-ва енергетики та вугіл. пром-сті України від 19.12.2013 № 966. Київ, 2014. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0327-14 (дата звернення: 11.05.2026).
9. Правила охорони праці під час технічного обслуговування та ремонту машин і обладнання сільськогосподарського виробництва : НПАОП 01.41-1.01-01 : затв. наказом М-ва аграр. політики України від 30.11.2001 № 354. Київ, 2001. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1072-01 (дата звернення: 11.05.2026).
10. Правила охорони праці у сільськогосподарському виробництві : НПАОП 01.1-1.01-12 : затв. наказом М-ва надзвичайн. ситуацій України від 26.11.2012 № 1353. *Офіційний вісник України*. 2013. № 4. С. 131. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z2146-12 (дата звернення: 11.05.2026).
11. Abrasive wear behaviour of 27MnB5 steel used in agricultural tines / Á. Kalácska et al. *Wear*. 2020. Vol. 442–443. P. 203107. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203107.
12. Analysis of the interaction mechanism between straw soil rotary tillage blade during rotary tillage process / Z. Wang et al. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. 691. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-024-80784-6.
13. Bhakat A. K., Mishra A. K., Mishra N. S., Jha S. Metallurgical life cycle assessment through prediction of wear for agricultural grade steel. *Wear*. 2004. Vol. 257, Iss. 3–4. P. 338–346. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.01.003.
14. Characterization and Evaluation of Engineered Coating Techniques for Different Cutting Tools—Review / S. Dabees et al. *Materials*. 2022. Vol. 15, Iss. 16. Art. 5633. DOI: https://doi.org/10.3390/ma15165633.
15. Design and experiment of bionic rotary blade based on claw toe of Gryllotalpa orientalis Burmeister / M. Xiao et al. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*. 2021. Vol. 52, Iss. 2. URL:

https://www.nyjxxb.net/index.php/journal/article/view/1134/1128 (дата звернення: 10.05.2026).

16. Effects of Bionic Units in Different Scales on the Wear Behavior of Bionic Impregnated Diamond Bits / Z. Wang et al. *Journal of Bionic Engineering*. 2016. Vol. 13, Iss. 4. P. 659–668. DOI: https://doi.org/10.1016/S1672-6529(16)60337-2.
17. Effects of Conservation Tillage on Soil Physicochemical Properties and Crop Yield in an Arid Loess Plateau, China / J. Li et al. *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. Art. 4716. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-020-61650-7.
18. Electrodeposition of Ni–ZnO nano-composite for protecting the agricultural mower steel knives / M. Refai et al. *Chemical Papers*. 2021. Vol. 75. P. 139–152. DOI: https://doi.org/10.1007/s11696-020-01291-2.
19. Integrated manufacturing of heterogeneous-material tillage wear-resisting parts based on selective laser melting / Y. Peng et al. *Journal of Alloys and Compounds*. 2025. Vol. 1014. Art. 178723. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.178723.
20. Kostencki P., Stawicki T., Królicka A. Wear of Ploughshare Material with Regards to the Temperature Distribution on the Rake Face When Used in Soil. *Journal of Tribology*. 2022. Vol. 144. Art. 041704. DOI: https://doi.org/10.1115/1.4053586.
21. Kumar R. et al. Bioinspired and Multifunctional Tribological Materials for Sliding, Erosive, Machining, and Energy-Absorbing Conditions: A Review. *Biomimetics*. 2024. Vol. 9, Iss. 4. Art. 209. DOI: https://doi.org/10.3390/biomimetics9040209.
22. Manani S., Patel N., Pradhan A. K. Effect of Modified Casting Process on Toughness and Wear Resistance of LM25 Alloy. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2023. Vol. 76. P. 1095–1102. DOI: https://doi.org/10.1007/s12666-022-02826-9.
23. Performance analysis of the soil-contacting parts for no-tillage planters and optimization of blade structure / Z. H. Hao et al. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2023. Vol. 39, Iss. 2. P. 1–13.
24. Preliminary investigation of convergent evolution-inspired serrated structure for optimization of mini rotavator blade's cutting-edge / Z. Zhang et al. *Applied*

Engineering in Agriculture. 2023. Vol. 39, Iss. 1. P. 95–108. DOI: https://doi.org/10.13031/aea.15243.

25. Research progress of conservation tillage technology and machine / H. E. Jin et al. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*. 2018. Vol. 49, Iss. 4. URL: https://www.nyjxxb.net/index.php/journal/article/view/602 (дата звернення: 10.05.2026).
26. Research Progress on the Wear Resistance of Key Components in Agricultural Machinery / Y. Wang et al. *Materials*. 2023. Vol. 16, Iss. 24. Art. 7646. DOI: https://doi.org/10.3390/ma16247646.
27. Research status and prospect of direct strip casting manufactured low-carbon microalloyed steel / S. Xu et al. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2022. Vol. 29. P. 17–33. DOI: https://doi.org/10.1007/s42243-021-00739-3.
28. Sidorov S. A. et al. Increasing the Wear Resistance and Other Life Characteristics of Materials of Tillage Tools. *Metallurgist*. 2021. Vol. 65. P. 593–601. DOI: https://doi.org/10.1007/s11015-021-01195-w.
29. Study on rotary tillage cutting simulations and energy consumption predictions of sandy ground soil in a Xinjiang cotton field / X. Zhang et al. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024. Vol. 217. Art. 108646. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108646.
30. The Design and Experimental Validation of a Biomimetic Stubble-Cutting Device Inspired by a Leaf-Cutting Ant's Mandibles / H. Qi et al. *Biomimetics*. 2023. Vol. 8, Iss. 7. Art. 555. DOI: https://doi.org/10.3390/biomimetics8070555.
31. Tribocorrosion and Abrasive Wear Test of 22MnCrB5 Hot-Formed Steel / D. Ulbrich et al. *Materials*. 2022. Vol. 15, Iss. 11. Art. 3892. DOI: https://doi.org/10.3390/ma15113892.
32. Tribological performance and failure mechanisms of soil-engaging components with brazed WC–Ni coatings / X. Zheng et al. *Tribology International*. 2026. Vol. 214, Part A. Art. 111139. DOI: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2025.111139.

33. Vargova M., Tavodova M., Monkova K., Dzupon M. Research of Resistance of Selected Materials to Abrasive Wear to Increase the Ploughshare Lifetime. *Metals*. 2022. Vol. 12, Iss. 6. Art. 940. DOI: https://doi.org/10.3390/met12060940.

34. Vidaković I., Heffer G., Grilec K., Samardžić I. Resistance of modified material surfaces for agricultural tillage tools to wear by soil particles. *Metalurgija*. 2022. Vol. 61, Iss. 2. P. 355–358. URL: https://hrcak.srce.hr/265921 (дата звернення: 10.05.2026).

35. Wear behavior of bionic impregnated diamond bits / Z. Wang et al. *Tribology International*. 2016. Vol. 94. P. 217–222. DOI: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.08.039.

36. Wear resistant hard alloys for agricultural machines elements / I. Koval et al. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2020. № 2 (98). С. 104–111. DOI: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2020.02.104.

37. Yu H., Han Z., Zhang J., Zhang S. Bionic design of tools in cutting: Reducing adhesion, abrasion or friction. *Wear*. 2021. Vol. 482–483. Art. 203955. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203955.

ДОДАТКИ