

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики  
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

Сенчило Максим Васильович

УДК 631.312:620.178.16:621.9

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ТА  
ЗНОСОСТІЙКОСТІ РОБОЧИХ АГРЕГАТІВ  
ГРУНТООБРОБНИХ МАШИН**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Сенчило М.В.

**Керівник роботи**

Міненко С.В.

кандидат технічних наук, доцент

**Житомир – 2025**

## АНОТАЦІЯ

**Сенчило Максим Васильович. Підвищення довговічності та зносостійкості робочих агрегатів ґрунтообробних машин. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.**

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Магістерська робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми підвищення надійності та ефективності ґрунтообробних машин шляхом удосконалення технології зміцнення ґрунторізальних робочих органів. У роботі виявлено протиріччя між традиційними підходами до підвищення довговічності ґрунтообробної техніки та вимогами до зниження енерговитрат у процесі обробітку ґрунту. Запропоновано біосистемний підхід до спільного підвищення надійності й ефективності ґрунтообробних робочих органів.

Обґрунтовано та експериментально перевірено нові способи переривчастого наплавлення зносостійкими матеріалами за біонічно обґрунтованими параметрами, які забезпечують формування в процесі експлуатації зубчастої або хвилястої геометрії ріжучих крайок лез. Установлено, що така форма лез сприяє зменшенню опору ґрунту різанню, зниженню контактного тиску на робочі поверхні та уповільненню процесів зношування.

Результати лабораторних, польових і виробничих випробувань підтвердили ефективність запропонованого підходу: інтенсивність зношування робочих органів зменшується до двох разів, а енерговитрати на обробіток ґрунту — до 70 % порівняно з традиційним суцільним наплавленням твердими сплавами. Отримані результати мають практичну цінність для підвищення ресурсу ґрунтообробної техніки та зниження витрат на її експлуатацію.

*Ключові слова: ґрунтообробні машини, ґрунторізальні робочі органи, зносостійкість, довговічність, переривчасте наплавлення, біонічно обґрунтовані параметри, самозаточування лез, зношування, твердосплавне наплавлення, кріогенна термообробка, енергоефективність, опір різанню ґрунту.*

## ANNOTATION

**Senchylo Maksym Vasylovych. Improving the Durability and Wear Resistance of the Working Units of Tillage Machines.** – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 Agricultural Engineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The master's thesis is devoted to solving a relevant scientific and applied problem of increasing the reliability and efficiency of tillage machines by improving the technology for strengthening soil-cutting working elements. The study identifies a contradiction between traditional approaches aimed at increasing the durability of tillage equipment and the requirement to reduce energy consumption during soil cultivation. A biosystem (bionic) approach is proposed for the simultaneous improvement of the reliability and efficiency of tillage working elements.

New methods of intermittent hardfacing with wear-resistant materials based on bionically justified parameters are substantiated and experimentally verified. These methods ensure the formation, during operation, of serrated or wavy geometries of cutting edges. It has been established that such edge shapes contribute to a reduction in soil cutting resistance, a decrease in contact pressure on working surfaces, and a slowdown of wear processes.

The results of laboratory, field, and industrial tests confirmed the effectiveness of the proposed approach: the wear rate of working elements is reduced by up to two times, and energy consumption for soil cultivation is reduced by up to 70% compared with traditional continuous hardfacing using hard alloys. The obtained results have practical value for increasing the service life of tillage equipment and reducing operating costs.

*Keywords: tillage machines, soil-cutting working elements, wear resistance, durability, intermittent hardfacing, bionically justified parameters, self-sharpening of blades, wear, hard-alloy hardfacing, cryogenic heat treatment, energy efficiency, soil cutting resistance.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	10
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	25
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ПРОВЕДЕНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	39
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	48

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** Сучасний розвиток сільськогосподарського виробництва супроводжується зростанням вимог до енергоефективності, надійності та довговічності ґрунтообробної техніки. В умовах підвищення вартості паливно-енергетичних ресурсів і матеріалів особливого значення набуває зниження енерговитрат на виконання ґрунтообробних операцій за одночасного забезпечення тривалого ресурсу робочих органів машин.

Аналіз сучасних конструктивно-технологічних рішень показує наявність суттєвого протиріччя між підходами, спрямованими на підвищення надійності ґрунтообробних машин, і методами збільшення їх експлуатаційної ефективності. З одного боку, традиційні способи підвищення довговічності робочих органів (суцільне наплавлення твердими сплавами, збільшення товщини лез, підвищення твердості матеріалу) часто призводять до зростання опору ґрунту різанню та збільшення енерговитрат. З іншого боку, заходи, спрямовані на зниження опору обробітку ґрунту, нерідко супроводжуються прискореним зношуванням робочих поверхонь і скороченням ресурсу деталей.

У зв'язку з цим актуальним є пошук нових підходів, які дозволяють одночасно підвищити як ефективність, так і надійність ґрунтообробних робочих органів без ускладнення їх конструкції. Перспективним напрямом вирішення цієї проблеми є застосування біосистемного (біонічного) підходу, що базується на використанні закономірностей взаємодії природних форм з абразивним середовищем.

Використання переривчастого наплавлення зносостійкими матеріалами за біонічно обґрунтованими параметрами створює умови для формування в процесі експлуатації керованої зубчастої або хвилястої геометрії ріжучих крайок. Така геометрія забезпечує ефект самозаточування лез, зменшення контактного тиску ґрунту на робочі поверхні та зниження опору різанню, що, у свою чергу, сприяє

зменшенню інтенсивності зношування й підвищенню енергетичної ефективності ґрунтообробних машин.

Отже, дослідження, спрямоване на наукове обґрунтування та експериментальну перевірку біонічно орієнтованих способів зміцнення ґрунторізальних робочих органів, є актуальним і має важливе практичне значення для сучасного сільськогосподарського машинобудування та експлуатації техніки.

**Метою магістерської роботи** є підвищення надійності та ефективності ґрунтообробних робочих органів шляхом розроблення й експериментального обґрунтування біонічно орієнтованих способів переривчастого наплавлення зносостійкими матеріалами, що забезпечують самозаточування ріжучих крайок і зниження енерговитрат у процесі експлуатації.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно розв'язати такі **завдання:**

Проаналізувати існуючі конструктивно-технологічні рішення підвищення надійності та ефективності ґрунтообробних робочих органів і виявити їхні недоліки.

Обґрунтувати доцільність застосування біосистемного (біонічного) підходу для зміцнення ґрунторізальних деталей.

Розробити способи переривчастого наплавлення зносостійкими матеріалами за біонічно обґрунтованими параметрами.

Створити програму та методику лабораторних, польових і виробничих випробувань ґрунтообробних робочих органів.

Дослідити вплив запропонованих способів наплавлення на інтенсивність зношування, довговічність та енергетичні показники роботи робочих органів.

Виконати порівняльну оцінку зносостійкості та ефективності серійних і дослідних зразків у реальних умовах експлуатації.

Оцінити практичну ефективність упровадження запропонованих технологічних рішень у сільськогосподарському виробництві.

**Об'єктом дослідження** є процес зношування та взаємодії ґрунторізальних робочих органів ґрунтообробних машин із ґрунтовим середовищем у процесі експлуатації.

**Предмет дослідження** є закономірності впливу біонічно обґрунтованих параметрів переривчастого наплавлення зносостійкими матеріалами на зносостійкість, довговічність і енергетичну ефективність ґрунторізальних робочих органів.

**Методи дослідження.** Для досягнення поставленої мети та розв'язання завдань магістерської роботи використано комплекс взаємодоповнювальних методів дослідження, що забезпечують достовірність і повноту отриманих результатів. Експериментальні дослідження виконано з використанням лабораторних методів випробування зносостійкості, що включали визначення масового та лінійного зношування зразків, вимірювання твердості та механічних властивостей матеріалів, а також аналіз характеру формування ріжучих крайок у процесі роботи в ґрунтовому середовищі. Для контролю фізико-механічних параметрів застосовано стандартні вимірювальні прилади та сертифіковані методики. Польові та виробничі дослідження проводилися в реальних умовах експлуатації ґрунтообробних агрегатів із використанням серійних і дослідних робочих органів. Застосовано методи порівняльних випробувань, що дозволили оцінити вплив запропонованих способів зміцнення на інтенсивність зношування, ресурс і енергетичні показники обробітку ґрунту.

Перелік **публікацій** за темою роботи:

1. Куликівський В.Л., Бистрицький Б.П., **Сенчило М.В.**, Халімовський С.А. Руденко В.Г., Веремій Т.Б. Методи підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. С. 352-360.

2. Лисюк О., **Сенчило М.** Смик В. Білецький В. Основні види робочих органів, що застосовуються на ґрунтообробних знаряддях та їх конструктивні особливості. Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості: збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Кам'янець-Подільський, 16 жовтня 2025 року). Кам'янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. С. 98-102

2. **Сенчило М. В.**, Смик В. С. Умови та технології самозагострювання робочих органів ґрунтообробних машин. Покращення техніко-економічних показників тракторів під час виконання сільськогосподарських операції. Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 86-90.

**Практичну значимість** Практичне значення магістерської роботи полягає в розробленні та обґрунтуванні технологічних рішень, спрямованих на підвищення ресурсу, надійності та енергоефективності ґрунтообробних машин у реальних умовах експлуатації. Запропоновані способи переривчастого наплавлення ґрунторізальних робочих органів зносостійкими матеріалами за біонічно обґрунтованими параметрами можуть бути безпосередньо впроваджені у виробництво та ремонт ґрунтообробної техніки без істотної зміни її конструкції.

Результати досліджень дозволяють рекомендувати нові технологічні схеми зміцнення лемешів, ножів та інших ґрунторізальних деталей для сільськогосподарських підприємств, ремонтних майстерень і сервісних центрів. Застосування запропонованих рішень забезпечує зменшення інтенсивності зношування робочих органів, подовження міжремонтних інтервалів і зниження витрат на їх заміну та відновлення.

Отримані експериментальні дані можуть бути використані при проектуванні нових зразків ґрунтообробних машин, а також під час модернізації

серійних моделей з метою зниження опору різанню ґрунту та скорочення енерговитрат на виконання технологічних операцій. Економічний ефект від упровадження результатів роботи полягає у зменшенні витрат палива, матеріалів і часу на технічне обслуговування та ремонт ґрунтообробної техніки.

Крім того, результати магістерської роботи можуть бути використані в навчальному процесі закладів вищої освіти аграрного та інженерного профілю при викладанні дисциплін, пов'язаних із ґрунтообробними машинами, зносостійкістю деталей і технологіями поверхневого зміцнення, а також як науково-методична основа для подальших досліджень у галузі підвищення ефективності та надійності сільськогосподарської техніки.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 28 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 50 сторінок комп'ютерного тексту, містить 23 рисунки та 5 таблиць.

## РОЗДІЛ 1

### СТАН ПИТАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 1.1. Методи підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин

При польових роботах більшість знарядь механічно взаємодіє з ґрунтом, а тому схильна до абразивного, ударного та корозійного зносу. У статистиці відмов робочих органів зношування є основною причиною втраченого ресурсу: у сучасних умовах 80–90 % відмов деталей сільськогосподарських машин пов'язано саме зі зносом [1]. Через зношування робочі органи змінюють форму й геометрію та потребують частого ремонту, що підвищує собівартість обробітку ґрунту. Підвищення зносостійкості та створення конструкцій з більшою довговічністю – одна з найактуальніших задач інженерії [1].

Науковці пропонують кілька стратегій підвищення зносостійкості: використання зносостійких матеріалів, оптимізація конструкції робочих органів, а також застосування різноманітних методів поверхневого зміцнення – від традиційних термічних і хіміко–термічних обробок до сучасних методів лазерного наплавлення, електроіскрового зміцнення й вакуумних покриттів [2]. Крім того, перспективним напрямом є створення самогострювальних робочих органів, що забезпечують сталість форми протягом усього ресурсу [1].

Нижче наведено детальний огляд типових робочих органів ґрунтообробних машин, їх конструктивних особливостей і матеріалів, а також сучасних методів підвищення зносостійкості [1].

У ґрунтообробних машинах використовуються різні робочі органи залежно від виду обробітку. Основні знаряддя характеризуються різними процесами взаємодії з ґрунтом (розрізання, підривання, кришіння та перевертання) і, відповідно, зазнають різних видів зносу [1].

Леміш – різальна частина корпусу плуга, що розрізає ґрунт. Класичний леміш підрізає шар на глибину 8–12 дюймів (20–30 см) і повністю перевертає його, закриваючи до 85 % пожнивних решток. Знизу леміш працює в найбільш агресивному середовищі, тому виготовляється з середньовуглецевої сталі із товщиною 8–10 мм; у деяких конструкціях передбачені змінні носки. Полиці плуга виготовляють із легованої сталі чи чавуну, вони відповідають за перевертання шару. Лемішне полотно часто комплектують зварними або змінними різальними пластинами [1].

Дискові борони або короткі дискатори застосовуються для подрібнення та перемішування поверхневого шару ґрунту. Сферичні диски (рис. 1.2.) з зубцями широко використовуються, оскільки вони інтенсивно взаємодіють із ґрунтом і краще подрібнюють рослинні рештки. Номінальний діаметр дисків змінюється від 400 до 660 мм; основним елементом зносу є край диска. Зубчасті диски ефективніше утримують різальний ефект, але їх складніше виготовляти та відновлювати. Для дисків типово застосовують сталі марок 30G, 50G, 65G або леговані хромисті сталі [1].

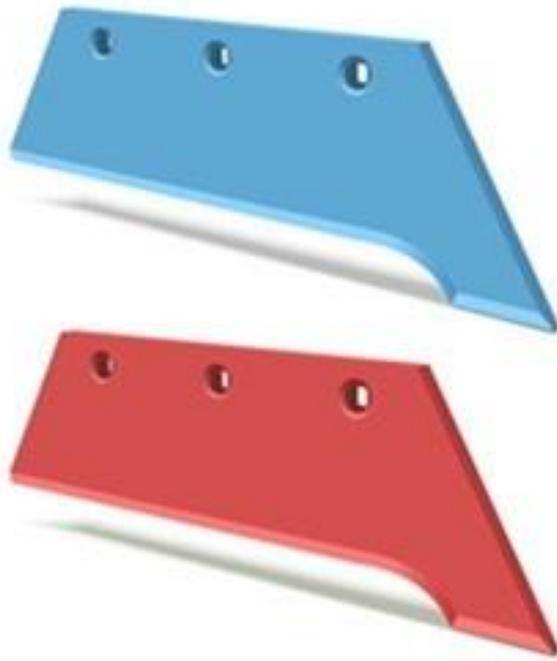


Рис. 1.1. Леміш [1].



Рис. 1.2. Вирізний сферичний диск [1].

Стрілчаста лапа культиватора зрізає бур'яни і кришить верхній шар ґрунту. Ширина лапи становить 100–300 мм. Для зменшення тягового опору та підвищення само-заточування пропонуються лапи із зубчастим профілем або з точковим зміцненням: наплавлені краплинні валики формують хвилясту різальну кромку, що забезпечує рівномірний знос і самозагострювання [1, 4]. Лапи виготовляють із пружинної сталі 60С2А, 65Г або 30MnB5; товщина зазвичай 4–6 мм [1].



Рис. 1.3. Стрілчаста лапа культиватора [1].

Чизельні лапи (рис. 1.4) мають вузькі долота, що розпушують ґрунт без перевертання. Для глибокого розпушування застосовують підбивники (ріпери) із масивними зубцями. Основні елементи – долото і носок – розраховані на високі ударні навантаження, тому виготовляються з борованих сталей (30MnB5, 27MnB5) та інколи оснащуються твердосплавними вставками. Термін служби доліт залежить від глибини та типу ґрунту [1].

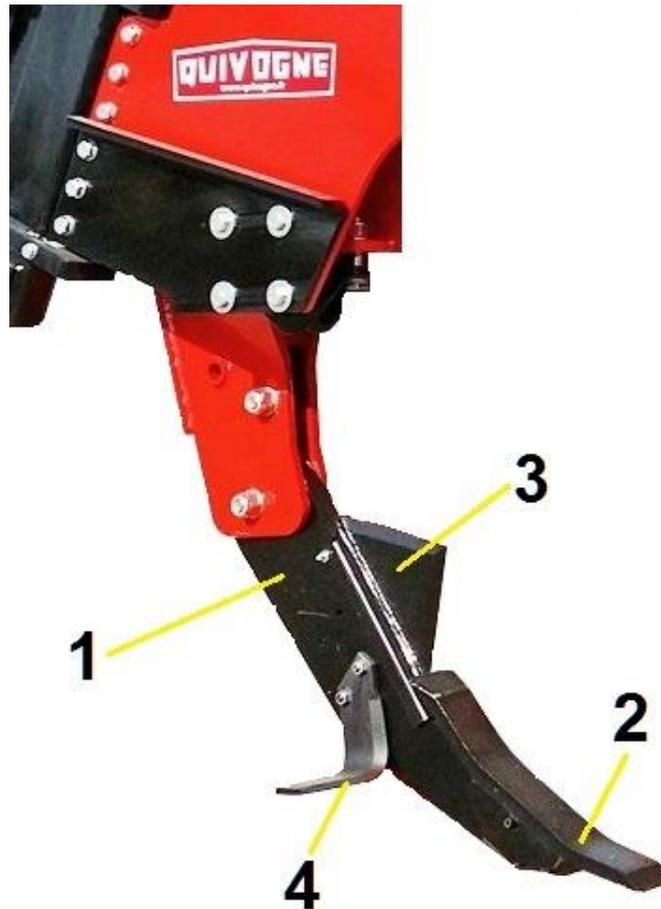


Рис. 1.4. Робоча секція чизеля: 1 – стійка, 2 -долото, 3 – зуб, 4 – крило [1].

Ножі ротаційних культиваторів і фрез (рис. 5) працюють у режимі багатократних циклів зігнення та удару, тому конструкція повинна забезпечувати одночасно високу зносостійкість і в'язкість. Для виготовлення використовують боровані сталі, інколи загартовані 50Г чи 55С2, з наступною високочастотною обробкою краю. Зношені ножі найчастіше замінюють, але існують технології відновлення наплавленням [1].



Рис. 1.6. Фреза культиватора Husqvarna TF 545P [1].

Підбір матеріалу є базовим елементом забезпечення довговічності. Наукові джерела виділяють декілька груп матеріалів для робочих органів ґрунтообробних машин [3]:

1. Вуглецеві та пружинні сталі. Середньовуглецеві сталі (наприклад, 45, 50Г), а також пружинні сталі 60Si2Mn та 65Г застосовують для лемешів, лап культиваторів і зубів борін. Лемішна група зазвичай має поверхнєве зміцнення або локальну гартування. Дослідження демонструють, що для підвищення зносостійкості ці сталі зварюють наплавленням твердих сплавів або зміцнюють індукційною термообробкою [1].

2. Боровані та марганцеві сталі. Сучасні плуги й підривники виготовляють із борованих сталей типу 30MnB5, 22MnCrB5, які після термообробки мають високу твердість і добру гартівність. Фізичні випробування показали, що термічно оброблена сталь 22MnCrB5 має у три рази вищу опірність абразивному зносу, ніж необроблена. Високомарганцеві сталі (Hadfield steel) використовують для деталей, що працюють з ударами (наприклад, ланцюгові пластини), оскільки вони здатні до зміцнення в процесі роботи [1].

3. Леговані сталі з хромом і нікелем. Для дискових борін рекомендуються хромисті сталі 38CrA, 40Cr, 45Cr, Cr12 або багатокomпонентні сплави 12CrNi3A,

17CrG2CFR, 08C18Ni10Ti. Хромісте та нікелеве легування підвищує твердість і корозійну стійкість [1].

4. Твердосплавні матеріали та композиційні сплави. У високонавантажених зонах використовують твердосплавні пластини (карбіди вольфраму, хрому, титану). Дослідження показують, що спечені тверді сплави на основі TiC–VC–WC/NiCr мають низький коефіцієнт тертя (0,46–0,62) й перспективні як матеріали для плужних лемешів та ножів культиваторів. Пластини карбіду вольфраму можуть збільшувати строк служби робочих органів у 8 разів порівняно з традиційними деталями [1].

5. Чавун та литі сплави. Для полиць плуга і молотків кормодробарок застосовують ковкий або високоміцний чавун, який забезпечує високу абразивну стійкість і прийнятну в'язкість. У середовищах з агресивними домішками (піскові ґрунти) використовують борований чавун [1].

Найбільшого поширення набули наступні методи підвищення зносотійкості: оптимізація конструкції, підбір та модифікація матеріалу, поверхневе зміцнення та покриття, композиційні та наноструктурні покриття та інтегральні підходи та комбіновані технології [1].

Оптимізація конструкції:

а) Збільшення товщини і застосування змінних елементів. Одним із простих способів продовження ресурсу є збільшення товщини матеріалу в зонах максимального зносу та використання змінних ріжучих елементів (носок лемеша, різальна пластина). Змінні леза дозволяють швидко відновити працездатність і зменшують витрати на ремонт [1].

б) Самозаточувальні конструкції. Застосування точкового наплавлення чи зубчастого профілю на кромці лемеша або лапи формує хвилясту форму різальної кромки. Під час роботи несучий шар інтенсивно спрацьовується, а наплавлений твердий сплав сповільнює знос, що створює пилкоподібну або хвилясту форму леза і забезпечує самозаточування. Така конструкція зменшує питоме навантаження на кромку й істотно знижує тяговий опір [1].

в) Біонічний підхід. Актуальним напрямком є використання природних прототипів (лапи гнойового жука, зуби броненосця) для оптимізації геометрії. Наприклад, лопаті культиватора з шипами, спроектованими за аналогією з кінцівками жука, знижували тяговий опір на 16,5 % і забезпечували кращу подрібнюваність ґрунту. Біонічні конструкції також зменшують налипання ґрунту на робочі поверхні [1].

Підбір та модифікація матеріалу:

1) Легування та термічна обробка. Вибір сталей із бором, хромом, ванадієм, марганцем та іншими елементами дозволяє збільшити гартівність та абразивну стійкість. Термічна обробка (гартування, відпуск, об'ємна та поверхнева індукційна обробка) забезпечує потрібну структуру. Наприклад, борована сталь 22MnCrB5 після гартування показує втричі менший знос, ніж необроблена. Газове карбонітрування плужного лемеша 30MnB5 зменшувало знос на 14,6 % порівняно з традиційною термообробкою [1].

2) Використання твердих сплавів та вставок. Застосування твёрдосплавних вставок (напаюваних пластин з карбиду вольфраму, хрому) суттєво підвищує ресурс. За даними виробників, шар напаяних пластин дозволяє подовжити строк служби деталей до 8 разів і економити кошти за рахунок зменшення простоїв. Твёрдосплавні інсerti ефективні на носках лап та доліт [1].

3) Композиційні матеріали. Розробляються композиційні сплави (наприклад, TiC–VC–WC/NiCr), що мають низький коефіцієнт тертя й можуть працювати у поєднанні з легованими сталями, зменшуючи коефіцієнт тертя до 0,46–0,62. Такі сплави перспективні для виготовлення повних лемешів або вставок [1].

Поверхневе зміцнення та покриття [3]:

а) Наплавлення та напайка. Традиційне рішення – наплавлення зносостійких шарів у зонах, що найбільше зношуються. Плазмове або індукційне наплавлення сплавом ПС-14-60 з додаванням карбиду бору (6 % В<sub>4</sub>С) знижувало інтенсивність спрацювання носкових ділянок лемеша в 1,7–1,8 рази порівняно з

базовою технологією. Точкове або краплинне наплавлення створює хвилясто-ступінчасту кромку, яка забезпечує самозаточування. У промисловості широко застосовується плазмово-порошкове наплавлення (РТА) та напайка готових твердосплавних пластин: така технологія забезпечує металургічне з'єднання й збільшує ресурс деталі, хоча є дорогою [1].

б) Покриття з твердих сплавів (обсадка, накладні пластини). У німецькій агротехніці популярні напаяні пластини з карбіду вольфраму. Вони паяються на заготовку та забезпечують відмінну зносостійкість; контур деталі зберігається протягом тривалого періоду. Недоліки – висока вартість і обмежена застосовність на кам'янистих ґрунтах [1].

в) Електроіскрове та електрофрикційне зміцнення. Електроіскрове зміцнення дозволяє наносити зносостійкі краплини твердого сплаву під дією іскрового розряду. У польових випробуваннях диски борони з 65Г сталі, зміцнені електричним розрядом з одночасним заточуванням під кутом  $30^\circ$ , мали в 1,76 разу більшу зносостійкість і зберігали самозаточування протягом 178 га роботи. Електрофрикційне зміцнення (ЕФТ) полягає у пропусканні струму високої щільності через контакт між інструментом і електродом. В дослідженнях для лемешів L53 сталі середня твердість покриття після ЕФТ становила 786 HV 0.1, що більш ніж утричі перевищує твердість основи, а ресурс плужних лез збільшився на 12–14 % порівняно із серійними, обробленими індукційним наплавленням [1].

4. Хіміко-термічна обробка. Газове карбонітрування та борування застосовують для плужних лемешів і ножів: обробка формує зміцнену поверхню товщиною 0,2–1 мм і підвищує твердість до 58–62 HRC. Польові тести показали, що газове карбонітрування лемешів 30MnB5 зменшує знос на 14,6 %, а об'єм спрацювання – на 24,6 %. Лазерне гартування та лазерне наплавлення створюють локальні зміцнені ділянки, що формують пилкоподібну кромку і знижують тяговий опір [1].

5. Фізичне та хімічне осадження покриттів. Тонкі покриття з TiN (фізичне осадження з парової фази), Cr, Ni або композиційних NiCrBSi сплавів забезпечують твердість 1000–1500 HV і значно зменшують абразивний знос. У польових випробуваннях лемеші з покриттям TiN мали кращу зносостійкість, ніж покриті хромуванням або нікелюванням [1].

6. Електролітичне і плазмове зміцнення. Електролітно-плазмова обробка і електроіскрове легування формують тонкі (50–100 мкм) тверді шари на сталевій основі. Переваги – низька витрата матеріалу і можливість локального зміцнення; недоліки – відносно невисока товщина і потреба у спеціалізованому обладнанні [1].

Наноструктуровані покриття на основі NiCrBSi та карбідів отримують шляхом вакуумного наплавлення або лазерного легування. Спресовані карбідні частинки підвищують твердість до 1500 HV і забезпечують ресурсотривалий шар. Перспективні також покриття на основі HVOF (high velocity oxy-fuel), які знижують коефіцієнт зносу більш ніж у 30 разів, порівняно з необробленим металом [3].

Найбільш ефективні програми відновлення і зміцнення робочих органів поєднують кілька методів. Наприклад, комбіноване застосування індукційного наплавлення з подальшим електрофрикційним зміцненням дозволяє спочатку утворити товстий шар сплаву, а потім ущільнити його, отримуючи високі значення твердості і щільності структури. Комбінування борованих сталей із наплавленими тврдосплавними вставками забезпечує баланс між вартістю та довговічністю. Важливо також враховувати селективність зносу: різні ділянки лемеша або лапи зношуються з різною інтенсивністю, тому доцільним є диференційоване зміцнення [3].

Ґрунтообробні машини оснащуються лемішами, полицями, дисками, стрілочастими лапами, чизельними долотами й ротаційними ножами. Кожен тип має свої конструктивні особливості та умови зносу. Сучасні робочі органи виготовляють з середньовуглецевих пружинних і борованих сталей (30MnB5,

22MnCrB5), хромистих і марганцевих сталей, чавуну, а також з композиційних твердосплавних матеріалів. Вибір матеріалу враховує співвідношення твердості і в'язкості, а також економічні аспекти [1].

Поверхнєве зміцнення є ключовим резервом підвищення ресурсу. Наплавлення твердих сплавів, напайка карбідів, газове карбонітрування, лазерне та електрофрикційне зміцнення, а також PVD-покриття значно знижують інтенсивність зношування. Наприклад, електрофрикційне зміцнення підвищує твердість до 786 HV і збільшує ресурс лез на 12–14 %, а застосування напаяних пластин із карбіду вольфраму може збільшити строк служби до восьми разів [1].

Ефективне підвищення зносостійкості повинно поєднувати оптимальну геометрію, правильний вибір матеріалу та сучасні технології поверхневого зміцнення. Селективне зміцнення зон з високим зносом, використання само-заточувальних конструкцій та біонічних принципів дозволяє підвищити продуктивність ґрунтообробних машин при мінімальних затратах енергії [1].

Таким чином, поєднання нових матеріалів, інноваційних технологій зміцнення та конструктивних вдосконалень забезпечує значне продовження ресурсу робочих органів і сприяє економічній ефективності сучасного землеробства [1].

## **1.2. Умови та технології самозагострювання робочих органів ґрунтообробних машин**

Зі зношуванням ріжучих елементів знижується якість обробки ґрунту, зростають тягові опори і витрата пального. Тому одним із перспективних підходів є використання ефекту самозагострювання, коли завдяки селективному зношуванню робочий орган сам підтримує оптимальну форму гострої кромки. Це дозволяє зменшити час простою на заточення, знизити витрати пального та експлуатаційні затрати, забезпечуючи стабільну якість обробітку ґрунту [3].

Механізми самозагострювання обумовлені селективним абразивним зношуванням різних ділянок робочого органу. У звичайних роботах із одношаровим інструментом поверхневий шар рівномірно стирається, що призводить до згладження кромки. Натомість при самозагострюванні швидкість зношування матеріалів різна: більш м'який або менш зносостійкий шар стирається швидше, залишаючи гостру кромку твердого матеріалу. Наприклад, вчені підкреслюють, що звичайні способи нанесення захисних покриттів (напилення, електродугове наплавлення тощо) не забезпечують ефекту самозагострювання: такі покриття швидко руйнують основний метал і кромка тупиться. У класичній двошаровій конструкції різального органа на поверхню наплавають зносостійкий шар, твердий за структурою, тоді як несучий шар (підкладка) є м'якшим. У процесі роботи м'які ділянки зношуються швидше, внаслідок чого гостра твердосплавна кромка завжди залишається на передньому плані. Наприклад, конструкція плужної лапи з товстим наконечником (self-sharpening point) передбачає поступове притуплення нижньої частини та автоматичне підйом гострої кромки наконечника. Як описує патент Емеріка (1947 р.), «передня частина точки плуга потовщена і має такий контур, що ріжуча кромка зношується гострою у процесі експлуатації». У сучасних конструкціях це часто реалізується з допомогою твердосплавних вставок: зносостійкий наконечник з карбїду або сталі вищої твердості вкладається в основу з нижчою тврдоцю, таким чином виходить самозагострювальна система [3].

Важливим чинником є геометрична форма робочого органу. Як правило, «передні» ділянки ріжучої кромки (контакт з непорушеним шаром ґрунту) повинні бути жорсткішими і зносостійкішими за «задні» (де ґрунт вже підірився). Прикладом є плужні корпуси з двошаровим пошаруванням: верхня (перша по ходу руху) точка виготовлена з твердосплавного сплаву, а далі за нею шар основного металу. За експлуатації під дією ґрунту нижній (задній) шар стирається активніше, а вершина наконечника залишається гострою. Крім двошарового наплавлення, застосовують сандвіч-конструкції (метал-метал) та

біполярне зварювання різних сталей. В роботах наголошується, що оптимальне співвідношення твердості між наплавленим шаром ( $H_t$ ) і основним металом ( $H_n$ ) повинно бути суворо підібране: отримують умову  $H_t = K \cdot H_n$ , де коефіцієнт  $K$  залежить від абразивності ґрунту. Як правило,  $K \approx 1,2-1,8$ ; при цьому шар повинен бути значно тверднішим, але не надто крихким. Таке співвідношення гарантує, що носій (м'який шар) зношується швидше, сприяючи постійному самоочищенню і самозагостренню плуги [3].

Матеріали та покриття відіграють ключову роль. Широко використовують твердосплавні вставки (вольфрамова карбіда, титануборид, тощо) для наконечників та ребер кромки. Наприклад, культиватори та дискові плуги часто оснащують твердосплавними зубами, які в сировинному вигляді повільно зношуються, а основний сталевий ніж відстає. Як повідомляє виробник KUHN, для копіювального наконечника Olympis застосовано самозагострювану форму – при її затупленні ґрунт швидко зношує посередині, залишаючи гострими бічні кромки. Версія Super Marathon взагалі використовує твердосплавний наконечник, що забезпечує «чотири-п'ятиразове» подовження ресурсу і підтримує гостру кромку в абразивному ґрунті. Комерційні конструкції часто містять вібраційні профілі або зміщення кромки, що також підвищує селективність зношування. Українські дослідники (Борак, Аулін тощо) підкреслюють, що необхідно діагонально комбінувати різні метали та сплави по товщині робочого елемента: носій повинен бути не занадто товстим (щоб його швидко стирали), а покриття достатньо міцним і твердим, але не настільки, щоб утворювати крихку структуру [3].

Крім матеріалів, важливе конструктивне рішення – розподіл форми та маси. Як зазначає один з дослідників: «роздільне товщення передньої і задньої частин дозволяє плугу самозагострюватися: при зношуванні задня частина сточуватиметься швидше, а передня кромка завжди залишатиметься гострою». Аналогічно, фірма Amazone випускає корпуси з потовщеною «зоною самозагострювання», що збільшує ресурс інструмента за рахунок додаткової

маси у робочій області. У наукових розробках трапляються двошарові плити з ребристим профілем або косим нахилом верхнього шару. Головне завдання – забезпечити вибірковість зношування: робити так, щоб надлишковий матеріал стирався, а гостра кромка формувалася зберігаючи кут заточування [3].

У лабораторних та польових дослідженнях зазвичай порівнюють звичайні і самозагострювані інструменти за зміною геометрії кромки та ресурсом. Наприклад, у одному експерименті китайські вчені виготовили набори зразків плужних лап із різними композитними покриттями Co-WC/MoS<sub>2</sub> методом лазерного наплавлення. Спершу на трибометрі вимірювали коефіцієнти зношування покриттів і підкладок, визначаючи співвідношення їх зносу для кожного зразка. Після цього обрали три найперспективніші варіанти (плюс контрольний зразок без покриття) та встановили їх на плуги, які випробовували у польових умовах на екстремально піщаних ґрунтах протягом 60 га культивування. Після випробувань спеціальним 3D-сканером вимірювали зміну ширини корпусу, товщини ріжучої кромки і втрату маси кожного робочого органа. Аналогічно, вітчизняні дослідники відзначають: зазвичай варіюють товщину та жорсткість шарів, форму кінчика, та вносять індексуєче покриття, після чого аналізують зносні характеристики і зміни профілю леза [3].

Зіставлення звичайних і самозагострюваних зразків демонструє суттєві відмінності. У згаданому китайському досліді традиційна ніжка (зразок 1) після 60 га пройшла робіт показала затуплення ріжучої кромки: її товщина зросла на 66,62% (що свідчить про відкладення матеріалу і округлення кромки). Натомість самозагострювані зразки (Sample 2 і 3) за того ж ресурсу проявили оборотний ефект: товщина кромки зменшилася на 26,90% і 17,00% відповідно (тобто зношився надлишок матеріалу і кромка стала гострішою). Масове зіставлення також на користь самозагострюваних конструкцій: зразок 3 (оптимальне співвідношення кристалів Co-WC до сталі  $\approx 1:3,67$ ) втратив лише  $\sim 7,98$  г/га<sup>2</sup>, тоді як контрольні зразки — більше, демонструючи кращу економію маси. Найбільш важливим результатом стало співвідношення швидкості зношування покриття до

основи: було встановлено, що при співвідношенні близько 1:3,33 (Co-WC/сталь) зниження затуплення кромки контролюється  $<0,03$  мм/га<sup>2</sup>, і досягається максимальна довговічність плужного корпусу. Якщо ж покриття стирається швидше або повільніше цього оптимуму, ефект падає: надто швидке зношування (коефіцієнт надто малий) зменшує захисний ефект покриття, а надто повільне призводить до більшого абразивного стирання «верхнього» шару, витончення кромки та підвищеного ризику його відколювання [3].

Загалом результати експериментів підтверджують принцип селективного зношування. Самозагострювані робочі органи демонструють підвищену стійкість до туплення: вони зберігають активну ріжучу кромку набагато довше і витримують більші обсяги роботи без обробки. Як висловлюють експерти, це має вагоме практичне значення: впровадження таких технологій дозволяє економити паливо, зменшувати частоту ТО і підвищувати точність обробітку ґрунту за рахунок постійної гостроти інструменту. Крім того, сталеві кінцеві кромки зі вставками карбїду або іншими зміцнюючими шарами мають більший ресурс — дослідї показали приріст довговічності до 12–14% (і більше) порівняно з традиційними методами загартування

Разом з тим існують обмеження. По-перше, технологічна складність виготовлення двошарових або композитних інструментів вища, що здорожчує їх виробництво. По-друге, занадто жорсткі покриття або великі перехідні кути можуть зробити інструмент крихким у дробових ґрунтах – відбуваються тріщини та вибоїни. Наприклад, якщо тверде покриття стирається занадто повільно (як у Sample 4), то за тривалої роботи верхній шар стає «глухим», кромка стоншується, і це може викликати відриви металу. З іншого боку, надто швидке зношування покриття позбавляє підкладку захисту. У важких умовах (кам'янистих, глинистих) карбїдні наконечники все ж можуть відколюватися або розхитуватися, що потребує додаткового кріплення. У цілому, для забезпечення самозагострювання потрібно жорстко контролювати параметри – товщину і твердість шарів, кут і профіль леза [3].

Отже, для реалізації ефекту самозагострювання робочого органа ґрунтообробної машини необхідно дотримуватися кількох ключових умов. По-перше, конструкція зазвичай двошарова: наплавлений зносостійкий шар значно твердіший за основу, але має оптимальне співвідношення твердості ( $H_t \approx (1,2-1,8) \cdot H_n$ ). По-друге, несучий шар повинен бути мінімальної достатньої товщини – щоб він швидко стирався і оголював гостру верхню кромку. По-третє, геометрія робочого органа розробляється з урахуванням переважного зношування другорядних поверхонь (виняток гострого носика та краю). За наявності цих умов інструмент здатний підтримувати свою ріжучу гостроту протягом тривалого часу [3].

Проведені дослідження (лабораторні та польові) підтверджують переваги самозагострюваних рішень: вони зберігають робочу кромку гострою, мають вищий ресурс і зменшують витрати на обслуговування. З іншого боку, обмеження пов'язані з технологічними вимогами до виготовлення та експлуатації – необхідністю застосування спеціальних покриттів і надточного виготовлення конструкції. Дальші дослідження мають зосередитися на точнішому математичному моделюванні процесів зношування і пошуку нових матеріалів та технологій зміцнення, що дозволять ширше застосовувати ефект самозагострювання у ґрунтообробній техніці [3].

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Оцінювання зносостійкості матеріалів, з яких виготовляють робочі елементи ґрунтообробних машин, може бути ефективно здійснене в умовах лабораторних досліджень за умови відтворення режимів, максимально наближених до реальних процесів абразивного зношування в ґрунтовому середовищі [3]. Водночас відсутність стандартизованої методики лабораторних випробувань, а також спеціалізованого серійного обладнання для таких досліджень зумовила необхідність створення оригінальної експериментальної установки, призначеної для вивчення процесів зношування деталей робочих органів у контакті з ґрунтом.

Під час проектування лабораторної установки основною метою було забезпечення максимально повного відтворення експлуатаційних умов функціонування ґрунтообробних елементів. Зокрема, враховувалися такі параметри, як швидкість відносного переміщення ґрунтового середовища, орієнтація та напрям дії навантаження, фізико-механічні й реологічні властивості абразивної маси, її гранулометричний склад та рівень вологості. Конструкція установки також передбачає можливість регулювання зазначених факторів у широкому діапазоні.

Для виконання лабораторних досліджень зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин було розроблено експериментальну установку кругового типу [2]. За функціональним призначенням вона є аналогічною відомому лабораторному стенду проф. Борака К. В., однак має низку принципових конструктивних відмінностей, спрямованих на підвищення адекватності моделювання реальних умов експлуатації.

Основні відмінні особливості розробленої установки полягають у такому:

– у процесі випробувань зразки здійснюють рух безпосередньо в ґрунтовому середовищі, тоді як абразив залишається нерухомим, що більш точно відповідає реальній роботі ґрунтообробних органів;

– конструкція установки оптимізована з метою мінімізації впливу опорної поверхні («дна») на результати експериментів, що підвищує достовірність отриманих даних;

– технічні характеристики стенда забезпечують проведення випробувань за лінійних швидкостей, близьких до робочих швидкостей реальних машин (2 м/с і вище).

Загальний вигляд лабораторної установки для дослідження зношування деталей робочих органів ґрунтообробних машин наведено на рис. 2.3.



Рис. 2.3. Загальний вигляд експериментальної лабораторної установки для дослідження процесів зношування робочих органів у ґрунтовому середовищі.

Зовнішній вигляд випробувального вузла наведено на рис. 2.4, а його принципову схему подано на рис. 2.5.



Рис. 2.4. Конструктивне виконання випробувального вузла.

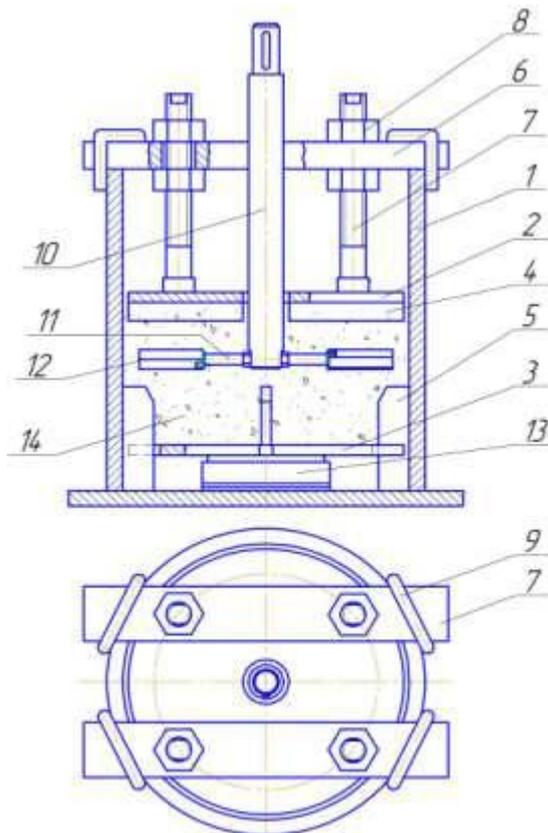


Рис. 2.5. Принципова схема випробувального вузла.

Випробувальний вузол є складальною конструкцією, до складу якої входять корпус (1) і кришка (2), рухоме днище (3), а також захисні пластини (4, 5), розміщені на внутрішніх поверхнях кришки та стінок корпусу. Навантаження на зразки забезпечується двома опорними балками (6), чотирма регулювальними

гвинтами навантаження (7) з відповідними гайками (8) та обмежувальними скобами (9). Передача обертального руху здійснюється за допомогою приводного вала (10), на якому встановлено два водила (11), що слугують для закріплення випробуваних зразків (12). Контроль прикладеного зусилля під час випробувань реалізується за допомогою датчика навантаження (13) [5]. Геометричні параметри та схема розміщення випробуваних зразків наведені на рис. 2.6.

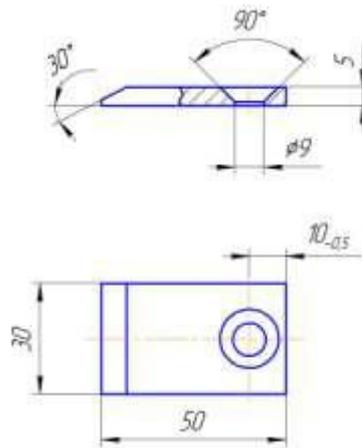


Рис. 2.6. Схематичне зображення експериментальних зразків із зазначенням їхніх розмірів.

Конструкцію вузла закріплення експериментальних зразків подано на рис. 2.7.



а

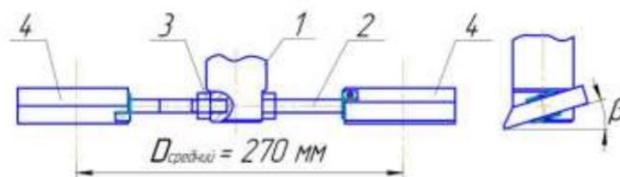


Рис. 2.7. Вузол кріплення зразків: а – загальний вигляд; б – схема з розмірами; 1 – вал; 2 – водило; 3 – гайка стопорна; 4 – випробувані зразки.

Закріплення випробуваного зразка на водилі здійснюється за допомогою скоби, розташованої на його кінцевій частині, та гвинта з потайною головкою. З'єднання водила з веденим валом реалізується шляхом його нагвинчування різьбовою частиною у відповідний різьбовий отвір вала. Фіксація просторового положення зразка відносно осі обертання, зокрема встановлення заданого кута  $\beta$ , забезпечується стопорною гайкою в місці кріплення [7].

Під час підготовки до випробувань у корпус випробувального вузла на днище (поз. 2) засипається ґрунт заданого складу (поз. 14 на рис. 2.5). Після цього приводний вал вузла (поз. 10) разом із закріпленими на ньому зразками занурюється в ґрунтове середовище шляхом осьового переміщення шпинделя верстата [2].

Далі на корпус встановлюється кришка (поз. 2), а необхідний рівень ущільнення ґрунту досягається за рахунок поступового загвинчування навантажувальних гвинтів (поз. 7) [2].

Контроль ступеня ущільнення ґрунтової маси у випробувальному вузлі здійснюється за допомогою датчика тиску (поз. 13), який розміщується під рухомим днищем (поз. 14). Для вимірювання тиску може застосовуватися датчик типу ДСТ 5.2.

Потужність, що передається від шпинделя верстата на приводний вал випробувального вузла, становить 2,2 кВт. Робочий діапазон частоти обертання шпинделя знаходиться в межах 26–120 хв<sup>-1</sup>.

За зазначеного діапазону частот обертання приводного вала лінійна швидкість переміщення випробуваних зразків може регулюватися ступінчасто в межах від 0,37 до 14 м/с.

Робота установки, призначеної для дослідження зношування деталей ґрунтообробних робочих органів у ґрунтовому середовищі, здійснюється за такою методикою. Перед початком експериментів на днище робочої камери встановлюють датчик зусилля стиснення. Кабелі передавання електричних сигналів від датчика виводять через спеціальний отвір у стінці камери та

під'єднують до вимірювально-реєструвального приладу. На поверхню датчика розміщують диск із радіальними прорізами, в які входять напрямні пластини, закріплені по внутрішньому периметру камери. Після цього об'єм камери над диском заповнюють ґрунтом заданого експериментального складу.

Підготовлені зразки деталей робочих органів фіксують на водилах за допомогою гвинтових з'єднань, після чого водила нагвинчують різьбовими кінцями у відповідні отвори на торці приводного вала. Випробувані зразки встановлюють під наперед заданим кутом  $\beta$  відповідно до умов досліду та надійно закріплюють шляхом затягування стопорних гайок. Далі приводний вал разом із водилами та зразками опускають у камеру таким чином, щоб робоча частина зразків розташовувалася приблизно посередині шару ґрунту.

Після цього в камеру встановлюють притискний диск, при цьому приводний вал проходить крізь центральний отвір диска, а напрямні пластини занурюються в ґрунтове середовище. Навантажувальні стрижні з'єднують із втулками притискного диска за допомогою шарнірних пальців, після чого на різьбові ділянки стрижнів нагвинчують наполегливі гайки до положення, за якого нижні кінці стрижнів залишаються вільними [2].

Над прорізом робочої камери встановлюють опорні бруси, які для запобігання зсуву фіксують під обмежувальними скобами. Через отвори в брусах пропускають різьбові кінці навантажувальних стрижнів і закріплюють їх фіксувальними гайками [2].

Після завершення монтажу приводний вал установки з'єднують із приводом, який забезпечує його обертання та утримання у заданому положенні [2]. Поступовим обертанням наполегливих гайок навантажувальні стрижні переміщують притискний диск донизу, унаслідок чого відбувається ущільнення ґрунту в камері.

Після досягнення необхідного рівня ущільнення, що відповідає умовам випробувань, фіксувальні гайки остаточно затягують, притискаючи їх до поверхні опорних брусів. Це забезпечує нерухомість навантажувальних стрижнів

і притискного диска, а також стабільність ступеня ущільнення ґрунту протягом усього експерименту [5]. Значення зусилля ущільнення контролюється датчиком стиснення та реєструється вимірювальним пристроєм (на рисунках не показано).

Для проведення випробувань на зношування запускають привід установки, у результаті чого приводний вал набуває обертального руху. Разом із валом обертаються водила та закріплені на них зразки деталей робочих органів [2].

Умови контакту зразків із ґрунтом під час випробувань мають відповідати реальним умовам експлуатації. Зокрема, зразки повинні здійснювати ковзання своєю робочою поверхнею по ущільненому ґрунту. Це досягається за рахунок нерухомості ґрунтового середовища в камері відносно рухомих зразків, що забезпечується напрямними пластинами, встановленими по периметру стінок камери та на притискному диску [2].

Ущільнений ґрунт створює абразивний вплив на поверхні зразків, унаслідок чого відбувається їх поступове зношування. Процес зношування фіксується за зміною геометричних параметрів і маси зразків. Для кількісної оцінки зносу після завершення випробувань зразки виймають з установки, піддають обмірам і зважуванню. Демонтаж установки здійснюють у послідовності, зворотній її складанню [2].

Випробувальний зразок являє собою прямокутну пластину з ріжучою крайкою, загостреною під кутом  $20^\circ$ . З метою визначення раціональної форми зміцнювального наплавлення зразки покривають шаром зносостійкого сплаву заданої товщини відповідно до теоретично обґрунтованих параметрів. Як еталон застосовують зразок зі сталі 65Г, термооброблений до твердості 40–42 НРС і наплавлений зносостійким сплавом того самого складу, що й експериментальні зразки. Еталонний зразок має суцільне наплавлення однакової товщини по всій довжині ріжучої кромки.

Випробування виконують одночасно для двох зразків, один з яких є еталонним. Оцінювання зносостійкості наплавлених фрагментів деталей робочих органів здійснюють за показниками лінійного та масового зносу. Для

біметалевих з'єднань із твердими сплавами визначають відносну зносостійкість зміцнених лез.

З огляду на значну кількість чинників, що впливають на процес зношування ґрунтообробних робочих органів, для повного аналізу необхідне виконання великої кількості експериментів. У даних дослідженнях обсяг випробувань було оптимізовано шляхом введення таких обмежень і припущень:

- лабораторні дослідження виконують за однієї характерної швидкості, що відповідає умовам роботи більшості ґрунтообробних знарядь і становить  $(2,0 \pm 0,2)$  м/с;

- як модельне середовище використано ґрунт середньосуглинистого механічного складу (33 % глини та 67 % піску) з твердістю 0,9–1,3 МПа на глибині обробітку;

- випробування проводять за двох значень кута різання:  $15^\circ$ , що відповідає умовам роботи культиваторних лап, ножів плоскорізів та аналогічних знарядь, і  $30^\circ$ , що моделює умови експлуатації лемешів плугів та наральників;

- досліджують зразки з наплавленням як з верхньої, так і з нижньої сторони леза.

Оскільки кожен експериментальний зразок випробовується одночасно з еталонним, кратність дослідів прийнята рівною одиниці. У разі отримання результатів, що не підлягають коректному порівнянню, випробування повторюють.

Для визначення твердості та межі міцності матеріалів деталей робочих органів застосовують універсальний твердомір NOVOTEST Т-УД2 з датчиками Д1 і У1, загальний вигляд якого наведено на рис. 2.8.

Кількісну оцінку зносу здійснювали методом масових вимірювань: зразки зважували на лабораторних вагах (рис. 2.9) з дискретністю 0,01 г до початку та після завершення випробувань, після чого знос визначали за величиною втрати маси.



Рис. 2.8. Твердомір який використовували в процесі дослідження.

Об'ємний знос  $V$ , який характеризує зміну геометричних параметрів і функціональної придатності деталі, визначали шляхом ділення втрати маси зразка на густину матеріалу.



Рис. 2.9. Загальний вигляд лабораторних ваг.

Результати експериментальних досліджень оцінювали за показником зносостійкості  $\sigma_w$  (хв/см<sup>3</sup>), який визначали як відношення часу випробувань  $t$  до об'ємного зносу  $V$ , а також за безрозмірним коефіцієнтом відносної зносостійкості  $\varepsilon$ , що обчислювали як співвідношення зносостійкості досліджуваного зразка  $\sigma_{w\text{обр}}$  до відповідного показника еталонного зразка  $\sigma_{w\text{ет}}$ .

Польові експерименти виконували з метою розширення та уточнення результатів лабораторних досліджень шляхом оцінювання ефективності

запропонованих робочих органів у реальних умовах експлуатації, зокрема за типових агрофонів і робочих швидкостей руху ґрунтообробних агрегатів.

Дослідження ефективності роботи ґрунтообробних органів у польових умовах включали такі основні етапи [6]:

- вибір дослідної ділянки та її загальну характеристику;
- агротехнічну оцінку якості виконання технологічного процесу;
- визначення енергетичних показників обробітку ґрунту.

Для реалізації програми досліджень підбирали земельні ділянки з такими розмірами та площею, які забезпечували можливість виконання всього комплексу запланованих робіт [6].

Під час характеристики вибраної ділянки визначали рельєф і мікрорельєф поверхні поля, тип ґрунту та його основні фізико-механічні властивості, ступінь засміченості камінням, глибину попереднього обробітку, а також глибину залягання ущільненого шару ґрунту відповідно до чинних методик [1, 6].

У день проведення польових випробувань враховували метеорологічні умови за даними метеостанції, а також визначали вологість, твердість і деформаційні характеристики ґрунту на досліджуваних глибинах.

Вологість ґрунту оперативно визначали експрес-методом із застосуванням ґрунтового вологоміра TR 46908.

Для виконання експериментів використовували спеціалізовану польову установку (рис. 2.10), що складається з рами (1), оснащеної передніми (2) та задніми (3) опорними колесами [3].

На рамі установки за допомогою кріпильних пластин (4) монтували дослідні зразки робочих органів (5). Між сережкою трактора (6) та причіпним пристроєм установки встановлювали модернізований тяговий гідравлічний динамограф ДТ-3 (8), обладнаний аналого-цифровим перетворювачем для передавання та реєстрації вимірювальних даних на переносний комп'ютер (ноутбук) (11).

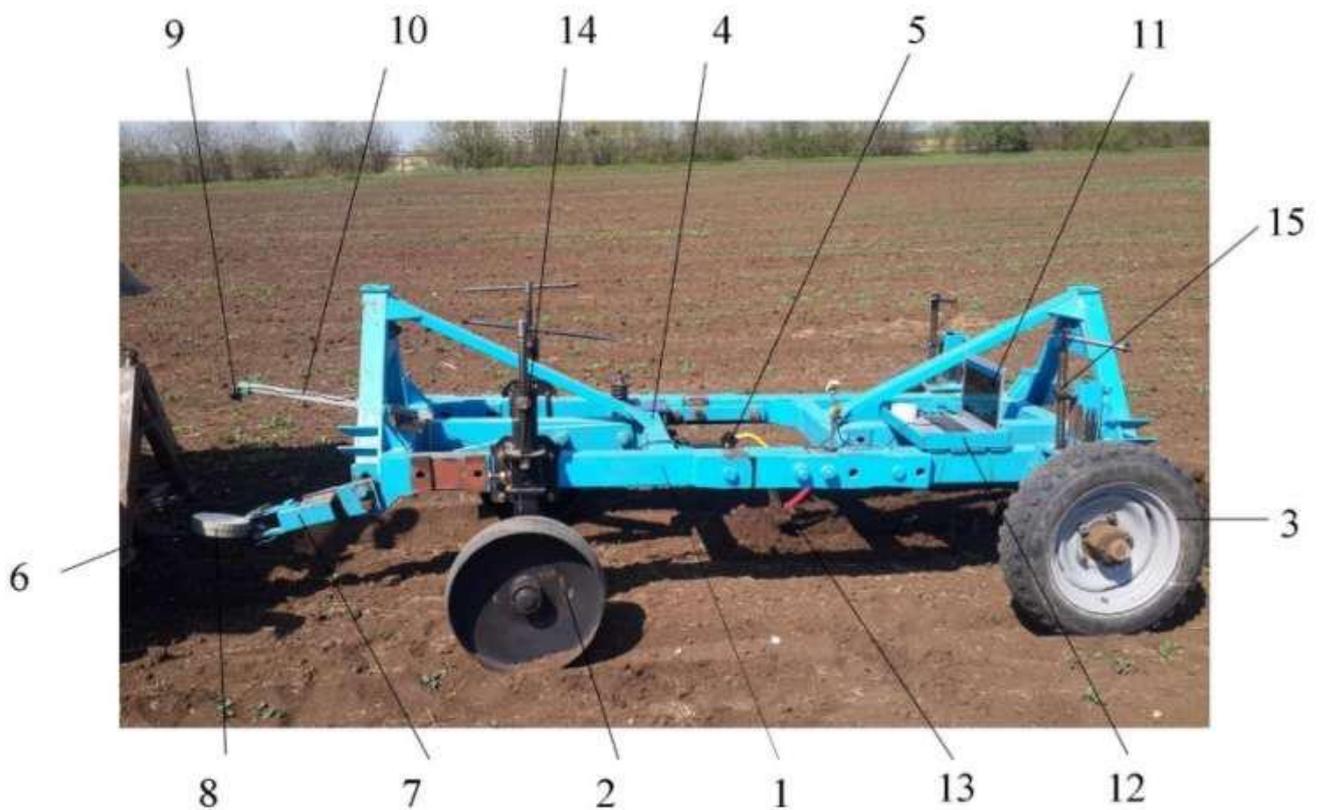


Рис. 2.10. Загальний вигляд експериментальної польової установки.

Схематичне зображення системи передавання та реєстрації вимірювальних сигналів від модернізованого тягового гідравлічного динамографа на переносний комп'ютер наведено на рис. 2.11.

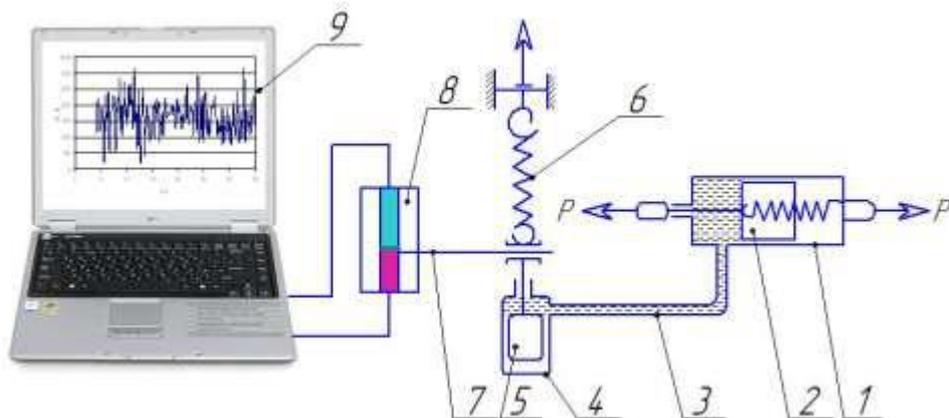


Рис. 2.11. Схема реєстрації показань модернізованого тягового гідравлічного динамографа на ноутбук.

У модернізованому тяговому гідравлічному динамографі поршневого типу (рис. 2.9) прикладене тягове зусилля  $P$  передається на поршень (2), розміщений у циліндрі (1). Унаслідок цього відбувається стиснення в'язкого мастильного

середовища, тиск якого по гнучкому шлангу (3) надходить до циліндра (4) реєструвального блока. Під дією створеного тиску плунжер (5) переміщується та розтягує вимірювальну пружину (6). Величина її деформації, що є пропорційною прикладеній силі, зумовлює відхилення важеля (7).

Переміщення важеля фіксується оптико-електронним датчиком аналого-цифрового перетворювача (8) і передається на персональний комп'ютер (9) у вигляді масиву цифрових значень, зареєстрованих у часовій послідовності з наперед заданою частотою дискретизації. Такий спосіб реєстрації забезпечує автоматизоване опрацювання експериментальних даних, скорочує тривалість їх аналізу та підвищує точність вимірювань.

З метою підтвердження достовірності показань модернізованого тягового гідравлічного динамографа виконували його калібрування методом ступінчастого навантаження з використанням еталонного повіреного динамометра типу ДПУ-0,5-2.

Виробничі випробування були спрямовані на комплексну оцінку експлуатаційних властивостей деталей ґрунтообробних робочих органів, зокрема на встановлення темпів їх зношування, рівня зносостійкості, напрацювання до граничного стану, а також загальної ефективності роботи в умовах реального сільськогосподарського виробництва [6].

Для забезпечення коректності та зіставності результатів, отриманих у різні періоди та за відмінних ґрунтово-кліматичних умов, дослідні зразки робочих органів випробовували паралельно зі штатними (серійними) аналогами, що дозволяло нівелювати вплив зовнішніх чинників на підсумкові показники.

Польові виробничі випробування виконували на сільськогосподарських угіддях ТОВ «Полісся», розташованих у Коростенському районі Житомирської області (рис. 2.12). Основною технологічною операцією була оранка ґрунту на глибину до 0,35 м [3].



а

б

Рис. 2.12. Плужні агрегати, залучені до експериментальних досліджень: а — плуг Diamant 11 виробництва компанії Lemken; б — плуг марки Kverneland.

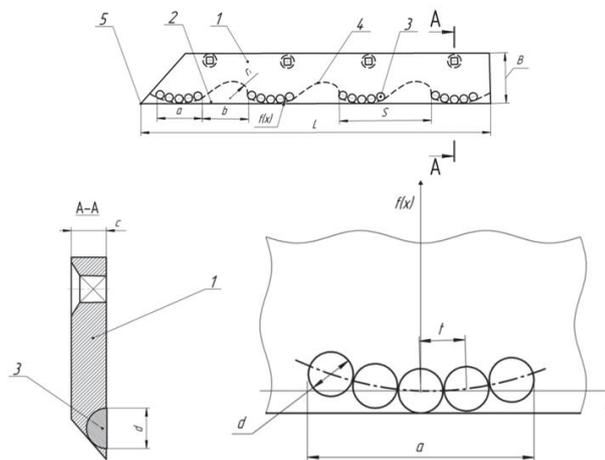


Рис. 2.13. Конструктивно-геометрична модель дискретного зміцнення лемеша: 1 — леміш; 2 — початкова ріжуча кромка ножа; 3 — наплавлені півсферичні елементи зносостійкого твердого сплаву; 4 — контур ріжучої кромки, сформований у процесі експлуатаційного зношування; 5 — носова частина ножа; а — ширина ділянок наплавлення; б — інтервал між суміжними зонами зміцнення; с — товщина базової частини ножа; d — діаметр наплавлених півсфер твердого сплаву; t — крок розміщення півсфер у межах однієї групи; В — загальна ширина ґрунторізального ножа; L — довжина початкової ріжучої кромки; S — величина взаємного зсуву сусідніх груп наплавлених елементів;  $f(x)$  — логарифмічна крива, вздовж якої орієнтовано центри півсфер твердого сплаву;  $r_i$  — радіус-вектор логарифмічної спіралі, що описує форму ділянки леза між суміжними зонами наплавлення після зношування.



Рис. 2.14. Стандартний робочий орган плуга.

### **Висновки до розділу**

Сформована програма та методичне забезпечення експериментальних досліджень дозволяють здійснити перевірку наукового припущення щодо доцільності зміцнення ґрунторізальних елементів за біонічно обґрунтованими параметрами. Такий підхід сприяє реалізації ефекту самозагострення ріжучих кромek у процесі експлуатації з формуванням хвилястої та зубчастої геометрії леза, що приводить до зменшення опору різанню та уповільнення процесів зношування. У результаті забезпечується підвищення ресурсу та довговічності робочих органів, а також створюються умови для всебічної оцінки впливу параметрів зміцнення на їх експлуатаційні властивості.

Для реалізації експериментальної програми спроектовано та виготовлено спеціалізовані лабораторні установки, призначені для дослідження процесів зношування деталей робочих органів у ґрунтовому середовищі, а також для оцінювання впливу глибокої холодової обробки на показники працездатності деталей із зміцнювальним наплавленням. Крім того, розроблено польову експериментальну установку, яка забезпечує дослідження впливу конструктивних параметрів і режимів роботи ґрунтообробних робочих органів на якісні та енергетичні показники процесу обробітку ґрунту.

## РОЗДІЛ 3

## РЕЗУЛЬТАТИ ПРОВЕДЕНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

На рис. 3.1 наведено зразки деталей ґрунтообробних машин, зміцнених різними методами, після завершення випробувань на зносостійкість.

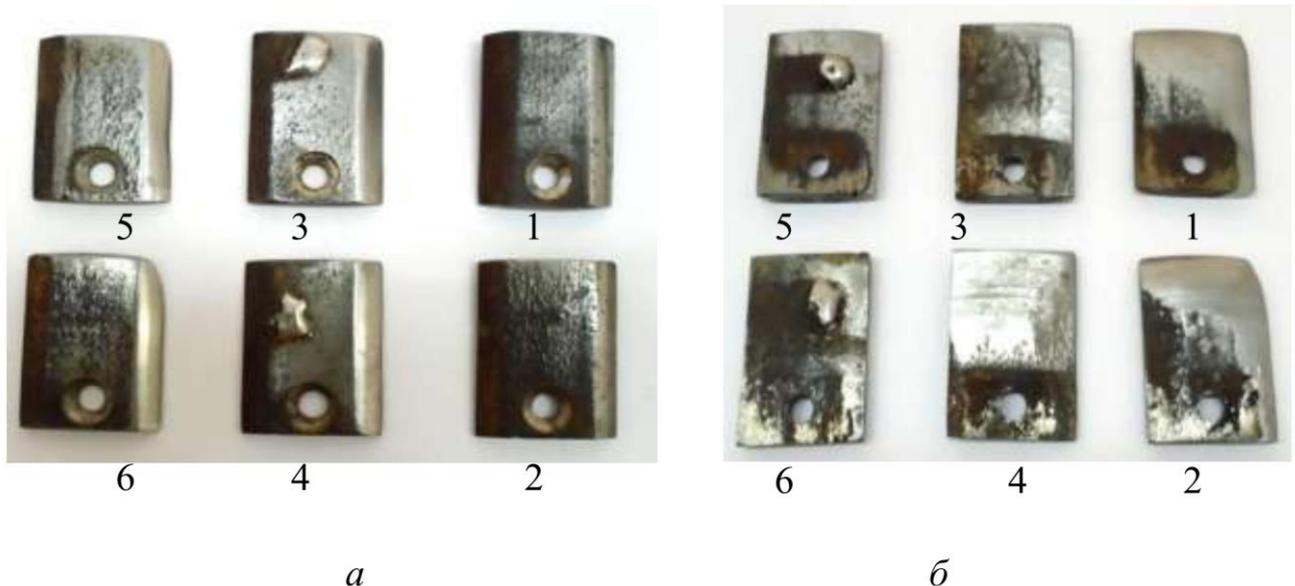


Рис. 3.1. Прояви зношування зразків деталей ґрунтообробних машин: а — вигляд зверху; б — вигляд знизу.

У таблиці 3.1 подано усереднені результати вимірювань твердості та межі міцності зразків деталей ґрунтообробних машин.

Підсумкові дані порівняльного аналізу зносостійкості дослідних зразків наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.1 – Показники механічних властивостей зміцнених зразків деталей ґрунтообробних машин.

Матеріал леміша	Твердість, HRC		Міцність в, МПа	
	до криог. термообробки	після криог. термообробки	до криог. термообробки	після криог. термообробки
Сталь 40Х	35,8	38,2	1073,8	1141,6
Наплавка	51,0	53,3	—	—

Таблиця 3.2 – Показники зносостійкості зразків деталей ґрунтообробних машин за результатами порівняльних випробувань.

№ дослідного зразка	Знос, г	Знос, мм	
		в зоні без наплавлення	в зоні з наплавленням
1	0,65	0,22	–
2	1,66	0,48	–
3	6,17	0,68	1,58
4	3,86	0,44	0,74
5	1,03	0,08	0,14
6	1,48	0,14	0,20

Аналіз експериментальних даних свідчить, що застосування обробки глибоким холодом позитивно вплинуло на фізико-механічні властивості як основного матеріалу, так і наплавленого шару. Зокрема, твердість сталі 40Х після криогенної обробки зросла в середньому з 35,8 до 38,0 HRC, тоді як твердість зміцнювального наплавлення підвищилася з 51,6 до 53,0 HRC. Одночасно з цим зафіксовано зростання межі міцності основного матеріалу, значення якої збільшилося з 1063,8 до 1121,4 МПа, що свідчить про покращення його несівної здатності та опору руйнуванню.

Водночас встановлено, що значний тепловий вплив, який супроводжує процес наплавлення, негативно позначається на зносостійкості матеріалу зразків. У результаті цього зразки з наплавленням № 3 та № 4 зазнали більш інтенсивного спрацювання порівняно із зразками без наплавленого шару. Такий ефект пояснюється формуванням у матеріалі зон з підвищеними внутрішніми напруженнями та неоднорідною структурою, що виникають унаслідок локального перегріву під час дії електричної дуги.

Разом із тим результати досліджень показали, що криогенна обробка істотно знижує інтенсивність зношування деталей ґрунтообробних машин. Так, масовий знос зразків після обробки глибоким холодом зменшився в 1,4–2,5 раза, а зношування за товщиною — у 1,6–2,4 раза, залежно від типу матеріалу та

способу зміцнення. Це свідчить про суттєве підвищення ресурсу деталей унаслідок застосування криогенної технології.

Отримані закономірності пояснюються структурними перетвореннями, що відбуваються в матеріалі під час глибокого охолодження. Переривчасте наплавлення зносостійким матеріалом супроводжується нерівномірним локальним нагріванням робочих поверхонь, унаслідок чого в металі формуються значні залишкові механічні напруження. Застосування обробки глибоким холодом сприяє більш повному перетворенню залишкового аустеніту на мартенсит як в основному матеріалі, так і в наплавленому шарі. Це забезпечує підвищення твердості, стабілізацію структури та одночасне зростання міцності матеріалу деталей [1].

На рисунках 3.2 та 3.3 наведено зразки елементів ґрунтообробних робочих органів, зміцнених різними технологічними методами та підданих криогенній термообробці, після завершення випробувань на зносостійкість на розробленій лабораторній установці (див. рис. 3.1).

Узагальнені результати порівняльного аналізу зносостійкості матеріалів робочих органів ґрунтообробних машин подано в таблиці 3.3.



а



б

Рис. 3.2. Стан поверхонь зразків без криообробки після випробувань на зносостійкість: а – зразок зі сталі 40Х без наплавлення; б – зразок зі сталі 40Х із наплавленою ріжучою кромкою

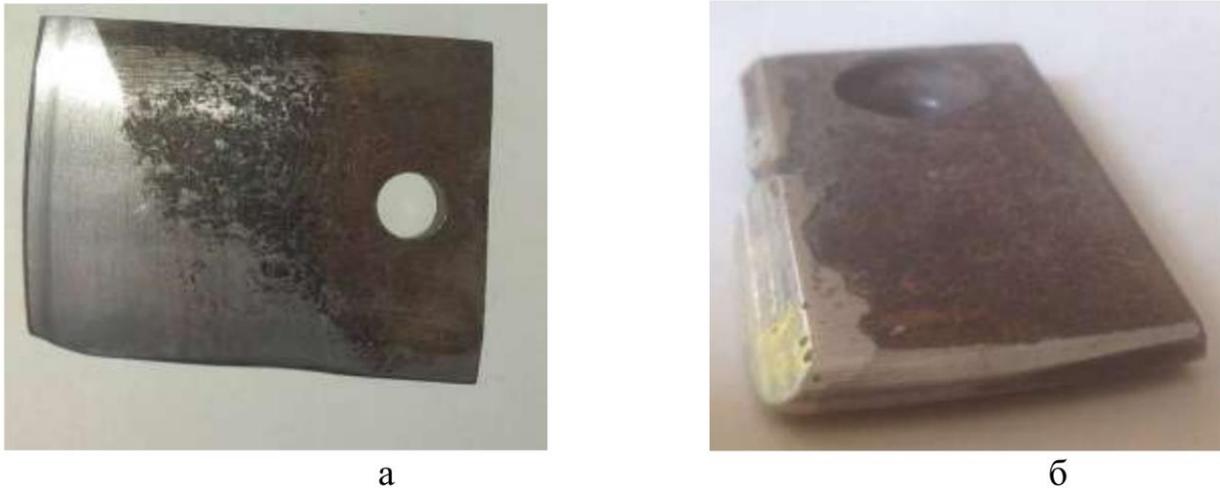


Рис. 3.3. Стан поверхонь зразків зі сталі 40Х після кріообробки: а — без зміцнення; б — зі зміцненням ріжучої крайки наплавленням.

Таблиця 3.3 – Показники зносостійкості матеріалів зразків ґрунтообробних робочих органів за результатами порівняльних випробувань.

Матеріал робочого органу	Масовий знос, г	Лінійний знос (по перерізу робочого органу), мм					Лінійний знос (довжина), мм
		0	1	2	3	4	
Сталь 40Х без застосування кріогенної термічної обробки.	11,58	4,8	2,3	0,5	0,12	0	2,9
Зразок зі сталі 40Х після завершення кріогенної термічної обробки.	7,69	2,6	0,6	0,7	0,12	0	1,8
Зразок зі сталі 40Х, зміцнений наплавленням твердого сплаву Т-590, який не піддавався кріогенній термообробці.	5,53	0,4	0,3	0	0,12	0,5	0,5
Сталь 40Х із наплавленим шаром твердого сплаву Т-590 після проведення кріогенної термічної обробки.	3,53	0,2	0	0	0	0,12	0,12

Аналіз експериментальних даних, наведених у таблиці 3.3, свідчить про виражений позитивний вплив кріогенної термічної обробки на зносостійкість досліджуваних матеріалів. Зокрема, для зразків зі сталі 40Х без наплавлення застосування кріообробки забезпечило зниження інтенсивності масового

зношування приблизно у 1,5 рази, тоді як величина лінійного спрацювання зменшилася в середньому у 1,6 рази. Це вказує на підвищення стабільності геометричних параметрів деталей у процесі експлуатації.

Ще більш суттєвий ефект було зафіксовано для зразків зі сталі 40Х, зміцнених наплавленням твердого сплаву Т-590. Після криогенної термообробки масовий знос таких зразків зменшився приблизно у 1,6 рази, а інтенсивність лінійного зношування за довжиною — майже у 3 рази порівняно зі зразками без криообробки [5]. Отримані результати підтверджують доцільність поєднання наплавлення зносостійким твердим сплавом і криогенної термообробки як ефективного комплексу технологічних заходів, спрямованих на підвищення ресурсу та експлуатаційної надійності ґрунтообробних робочих органів.

Нижче подано узагальнені результати експериментальних вимірювань твердості робочих поверхонь лемішів, які були встановлені на плужні агрегати та експлуатувалися в умовах виробничих випробувань. Отримані значення систематизовано та наведено в таблиці 3.4, що дає змогу здійснити порівняльну оцінку впливу різних способів зміцнення й термічної обробки на твердість матеріалу робочих органів.

Таблиця 3.4 – Результати вимірювання твердості робочих поверхонь лемішів.

Робочий орган	HRC
Базовий матеріал робочого органу	16,30±3,18
Сормайтове наплавлення серійних робочих органів	56,49±1,08
Наплавлені елементи з використанням порошкового матеріалу	46,19±2,90

У процесі обробітку посівних площ за умов виробничої експлуатації було отримано експериментальні дані щодо масового зношування лемішів. Результати вимірювань втрати маси робочих органів після виконання запланованого обсягу ґрунтообробних робіт систематизовано та наведено в таблиці 3.5, що дає змогу

оцінити вплив конструктивних і технологічних факторів на інтенсивність їх спрацювання.

Таблиця 3.5 – Результати визначення втрати маси лемішів у процесі експлуатації.

Вид зміцнення	Напрацювання на один робочий орган, га	Масовий знос, г
Покриттям із суцільного шару сплаву «сормайт».	11	159
Дискретним наплавленням із застосуванням порошкового дроту.	11	48
Багаторівневим (ступеневим) наплавленням із застосуванням порошкового дроту.	11	108

Аналіз експериментальних даних, отриманих у ході виробничих випробувань, свідчить про істотну різницю в інтенсивності зношування лемішів залежно від способу їх зміцнення. Найбільшу втрату маси зафіксовано у контрольного леміша із суцільним наплавленням ріжучої кромки твердим сплавом «сормайт», масовий знос якого становив 159 г. Водночас мінімальні значення зношування були характерні для леміша, зміцненого методом точкового наплавлення порошковим матеріалом, для якого втрата маси не перевищила 48 г.

Під час експлуатації встановлено, що серійні леміші з безперервним наплавленням твердим сплавом не забезпечують реалізації ефекту самозаточування ріжучої кромки. Унаслідок цього леза таких лемішів поступово затуплювалися, що негативно впливало як на їх зносостійкість, так і на енергетичні показники обробітку ґрунту. Натомість леміші з переривчастим наплавленням зносостійкого матеріалу характеризувалися стабільнішою геометрією ріжучої крайки: упродовж усього періоду випробувань товщина їх лез не перевищувала 1,8 мм [4]. Це підтверджує доцільність застосування дискретних схем наплавлення для підвищення експлуатаційної довговічності ґрунтообробних робочих органів.

## Висновки до розділу

У результаті експлуатаційних і експериментальних досліджень встановлено, що лемеші, зміцнені методом переривчастого наплавлення зносостійким матеріалом за біонічно обґрунтованими параметрами, у процесі роботи зазнають керованої зміни геометрії ріжучої крайки. Зокрема, леза таких лемешів поступово формують зубчасту або хвилясту конфігурацію, що забезпечує реалізацію ефекту самозаточування. Унаслідок цього інтенсивність лінійного спрацювання ріжучих кромek зменшується приблизно на 32 %, а масовий знос – на 23 % порівняно з традиційними конструктивними рішеннями.

Запропонований спосіб переривчастого наплавлення ріжучих частин ґрунтообробних робочих органів з використанням зносостійкого електродного матеріалу та біонічно обґрунтованої схеми розміщення наплавлених елементів сприяє істотному зниженню енерговитрат у процесі обробітку ґрунту. За результатами випробувань встановлено, що енергоспоживання під час роботи таких лемешів може бути зменшене до 70 % порівняно з лемешами, зміцненими суцільним наплавленням твердим сплавом «сормайт». Досягнутий ефект пояснюється зниженням опору різанню ґрунту завдяки самозагострювальній дії та формуванню оптимальної зубчастої геометрії леза.

Крім енергетичних переваг, переривчасте наплавлення забезпечує підвищення зносостійкості лемешів у цілому. За однакових умов експлуатації інтенсивність масового зношування таких лемешів є меншою приблизно у 1,2 раза, а лінійного зношування – у 2 рази порівняно з лемешами, на яких застосовано суцільне наплавлення сплавом «сормайт». Сукупність зазначених ефектів підтверджує доцільність і техніко-економічну ефективність запропонованого способу зміцнення ріжучих частин ґрунтообробних робочих органів, що дозволяє одночасно підвищити їх ресурс і знизити енерговитрати на виконання технологічних операцій.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У ході виконання дослідження встановлено наявність принципової невідповідності між традиційними підходами до підвищення надійності та способами зростання ефективності ґрунтообробної техніки. З'ясовано, що застосування поширених конструктивно-технологічних рішень, спрямованих на підвищення довговічності та міцності робочих органів, у багатьох випадках супроводжується погіршенням їх експлуатаційної ефективності, зокрема зростанням енерговитрат і опору обробітку ґрунту. Водночас методи, орієнтовані переважно на підвищення ефективності ґрунтообробних машин, нерідко призводять до прискореного зношування робочих елементів і зниження їх ресурсу. Виявлене протиріччя обґрунтовує необхідність формування нової концепції, яка забезпечує одночасне й узгоджене підвищення як надійності, так і ефективності ґрунтообробних машин та знарядь.

У роботі обґрунтовано доцільність реалізації такої концепції на основі біосистемного (біонічного) підходу, що передбачає врахування закономірностей взаємодії природних форм з абразивним середовищем. У межах цього підходу запропоновано нові технологічні рішення зміцнення ґрунторізальних деталей, які базуються на застосуванні переривчастого наплавлення зносостійкими матеріалами за біонічно обґрунтованими параметрами. Реалізація запропонованих способів наплавлення забезпечує формування в процесі експлуатації зубчастої або хвилястої геометрії ріжучих крайок лез, що принципово змінює характер їх взаємодії з ґрунтовим середовищем.

Установлено, що утворення керованої зубчасто-хвилястої форми ріжучої крайки сприяє зниженню опору ґрунту різанню, зменшенню контактного тиску ґрунту на робочі поверхні ґрунторізальних деталей і, як наслідок, істотному уповільненню процесів їх зношування. Завдяки цьому досягається одночасне підвищення зносостійкості, ресурсу та енергетичної ефективності роботи ґрунтообробних робочих органів без ускладнення їх конструкції.

Результати виробничих випробувань, проведених у сільськогосподарських підприємствах, повністю підтвердили теоретичні положення та експериментальні висновки дослідження. Зокрема, доведено, що в реальних умовах експлуатації відбувається стабільне формування зубчастих або хвилястих форм ґрунторіжучих лез зі зносостійким наплавленням за біонічно обґрунтованими параметрами. Це забезпечує зниження інтенсивності зношування робочих поверхонь приблизно вдвічі порівняно з традиційними суцільними схемами наплавлення та підтверджує практичну ефективність запропонованого підходу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Куликівський В.Л., Бистрицький Б.П., Сенчило М.В., Халімовський С.А. Руденко В.Г., Веремій Т.Б. Методи підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. Збірник тез доповідей ХХVІ Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. С. 352-360.
2. Лисюк О., Сенчило М. Смик В. Білецький В. Основні види робочих органів, що застосовуються на ґрунтообробних знаряддях та їх конструктивні особливості. Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості: збірник матеріалів І Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Кам'янець-Подільський, 16 жовтня 2025 року). Кам'янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. С. 98-102
3. Сенчило М. В., Смик В. С. Умови та технології самозагострювання робочих органів ґрунтообробних машин. Покращення техніко-економічних показників тракторів під час виконання сільськогосподарських операції. Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 90-92.
4. Aulin V., Warouma A., Borak K. Amélioration de la résistance à l'usure des outils de travail des machines aratoires à disques. Journal of Applied Biosciences. 2014. 83:7545– 7553. <http://dx.doi.org/10.4314/jab.v83i1.7>.
5. Кобець А.С., Пугач А.М. Методи і способи підвищення зносостійкості робочих органів культиваторів. Вісник Дніпропетровського державного університету. 2010. № 1. С. 61-63.

6. Борак К. В. Комплексний підхід підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.05.11 / Поліський національний університет, м. Житомир. 2021. 380.
7. Rogovskii, I. L., Borak, K. V., Maksimovich, E. Yu., Smelik, V. A., Voinash, S. A., Maksimovich, K. Yu., & Sokolova, V. A. (2020). Wear resistance of blade and disc working bodies of tillage tilling machines hardened by electrodes. T-series. *Journal of Physics : Conference Series*. 1679 (4), art. №. 042084.
8. Борак К. В. Impact of soil moisture on wear intensity of the actuating elements of soil processing machines. *Міжнародний науковий журнал «Проблеми трибології»*. 2020. № 2. С 34–41.
9. Борак К. В., Крук І. С. Вплив швидкості руху ґрунтообробних агрегатів на інтенсивність зношування робочих органів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2020. №1. С. 30–36.
10. Борак К. В. Impact of soil moisture on wear intensity of the actuating elements of soil processing machines. *Проблеми трибології*. 2020. № 2. С 34–41.
11. Борак К. В., Куликівський В. Л. *Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів. Ч. 1: Теоретичні основи матеріалознавства : навч. посіб.* Житомир : Поліський нац. ун-т, 2024. 101 с.
12. Borak, K. V., Kulykivskiy V. L. Borovskiy V. M. Rudenko V. G., Dobranskiy S. S. Increasing the wear resistance of the working bodies of tillage machines by electrical discharge machining. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. Випуск 3 (48) 2025. Технічні науки. С.149-160.
13. Dvoruk V.I., Borak K.V., Buchko I.O., Dobranskiy S.S. Destruction of Strain Hardened Steel Upon Abrasive Wear. *Journal of Friction and Wear*. 2021. Vol. 42 (3). P. 178-184.
14. Borak K. Ensuring the equistability of the tillage tools wearout , *Works of VNTU*, no. 1, Feb. 2023. DOI: <https://doi.org/10.31649/2307-5392-2022-1-19-29>.
15. Hutchings I. M., Shipway P. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. 2nd ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2017. 412 p.

16. Davis J. R. Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics. Materials Park, OH : ASM International, 2002. 358 p.
17. Zum Gahr K. H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam : Elsevier, 1987. 560 p.
18. Wang Q., Zhou Y., Liu Z. Effect of hardfacing materials on wear resistance of tillage tools. *Wear*. 2019. Vol. 426–427. P. 1153–1161.
19. Totten G. E., Funatani K., Xie L. Handbook of Metallurgical Process Design. Boca Raton : CRC Press, 2004. 1114 p.
20. Karimi A., Verdon C. Wear behavior of hardfaced agricultural tools. *Tribology International*. 2018. Vol. 119. P. 79–88.
21. Baldissera P., Delprete C. Deep cryogenic treatment of steels: a review. *Materials & Design*. 2008. Vol. 29(3). P. 611–623.
22. Rajasekaran B., Muthukumaran S. Influence of cryogenic treatment on wear resistance of tool steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2016. Vol. 25. P. 2211–2219.
23. Rabinowicz E. Friction and Wear of Materials. Paris : Dunod, 2015. 352 p.
24. Stachowiak G. W., Batchelor A. W. Ingénierie de l'usure des matériaux. Paris : Hermès Science, 2014. 498 p.
25. Dupont J.-N. Hardfacing alloys for wear resistance. *Revue de Métallurgie*. 2016. Vol. 113. P. 221–229.
26. Bernard J., Martin P. Étude de l'usure des organes travaillants des machines agricoles. *Matériaux & Techniques*. 2018. Vol. 106(4). P. 401–409.
27. Le Roux S. Traitements thermiques et de surface des aciers. Paris : Techniques de l'Ingénieur, 2013. 420 p.
28. Fontaine M., Dubois F. Influence du rechargement dur sur la durée de vie des outils agricoles. *Tribologie*. 2019. Vol. 12. P. 55–63.