

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
“__” _____ 2025р.
Зав. кафедри д.т.н., професор
(науковий ступінь, вчене звання)
В.В. Дідур
(підпис) (ініціали, прізвище)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА (дипломний проект)
магістр
(назва освітнього ступеня)

тема роботи **«Підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів
ґрунтообробних машин»**

Виконав: студент 2 курсу, групи 21м-з-ім
освітньої програми магістр
спеціальності 208 «Агроінженерія»
Романюк Є.Ф.
(прізвище та ініціали)

Керівник доктор філософії доцент Шевчук М.В.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

м. Умань – 2025 рік

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ТА ЗНОСОСТІЙКОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ГРУНТООБРОБНИХ МАШИН.....	9
1.1. Забезпеченість ґрунтообробною технікою агропромислового комплексу та конструктивні особливості робочих органів ґрунтообробних машин	9
1.2. Аналіз зношування робочих органів ґрунтообробних машин та процесів, які протікають у зоні фрикційного контакту	13
1.3. Висновки до розділу	22
РОЗДІЛ 2 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ГРУНТООБРОБНИХ МАШИН КОМПЛЕКСНИМ ПІДХОДОМ АДАПТАЦІЇ ЇХ ЗНОСОСТІЙКОСТІ.....	23
2.1. Методологічні основи та програма досліджень.....	23
2.2. Фізико-математична модель системи «робочий орган – ґрунт»	25
2.3. Наукові основи досягнення ефекту самозагострювання та рівностійкості зношування робочих органів ґрунтообробних машин	32
2.4. Вплив абразивного зношування на атмосферну корозію робочих органів ґрунтообробних машин.....	43
2.5. Висновки по розділу 2	48
РОЗДІЛ 3 ОХОРОНА ПРАЦІ	49
3.1 Організація умов та заходів з охорони праці в господарстві	49
3.2 Аналіз умов та заходів з охорони праці під час роботи дисковими ґрунтообробними машинами	50
3.3 Висновки по розділу.....	52

РОЗДІЛ 4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ	53
4.1 Техніко-економічний аналіз комплексного підходу підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин	53
4.2 Висновки по розділу 4	54
ВИСНОВКИ	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	57

6
РЕФЕРАТ

Романюк Є.Ф. Підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин (Кваліфікаційна робота, Уманський національний університет, 2025: пояснювальна записка на 58 сторінках, у т.ч. 4 розділів, 17 рисунки, 6 таблиць, 26 джерела літератури).

Кваліфікаційна робота присвячена розв'язанню науково-прикладної проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. Основою дослідження є комплексний підхід із використанням технологічних і конструктивних методів підвищення зносостійкості та довговічності робочих органів з урахуванням умов експлуатації та науково обґрунтованої системи їх обслуговування.

На сьогодні більшість відомих технологічних методів забезпечує підвищення довговічності лише для певних ґрунтово-кліматичних умов. Такий підхід не гарантує стабільного підвищення довговічності й зносостійкості при зміні умов та режимів експлуатації.

Мета роботи – підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин шляхом застосування комплексного підходу, що адаптує їх зносостійкість до ґрунтово-кліматичних умов та режимів експлуатації.

Об'єкт дослідження – процеси зміни конструктивних та технологічних параметрів робочих органів ґрунтообробних машин.

Предмет дослідження – розроблення комплексного підходу підвищення довговічності робочих органів із врахуванням впливу ґрунтово-кліматичних умов, конструктивних і технологічних параметрів, режимів експлуатації та умов зберігання.

Ключові слова: ҐРУНТ, ҐРУНТООБРОБНА МАШИНА, ДОВГОВІЧНІСТЬ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ, НАДІЙНІСТЬ, КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД, ЛЕМІШ, СТІЛЧАСТА ЛАПА, ДИСКОВИЙ РОБОЧИЙ ОРГАН.

Актуальність теми. У розвинутих країнах втрати, зумовлені лише наслідками абразивного зношування, становлять від 1 до 4 % національного валового продукту [1]. В агропромисловому комплексі найбільшого впливу абразивного зношування зазнають робочі органи ґрунтообробних машин, які безпосередньо взаємодіють із ґрунтовим середовищем.

Ґрунтообробні машини посідають одне з провідних місць у структурі машинно-тракторного парку сучасних аграрних підприємств. Втрата їх працездатності під час польових робіт може істотно вплинути на урожайність сільськогосподарських культур. У більшості таких машин саме робочий орган є елементом, що визначає довговічність і надійність конструкції.

Тому підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин є важливим завданням для агропромислового комплексу України. Його вирішення потребує комплексного підходу з боку конструкторів, технологів, науковців і працівників аграрного виробництва.

Нині основна увага при вирішенні цієї проблеми зосереджується на покращенні зносостійких властивостей поверхні та удосконаленні геометричної форми робочих органів, часто без належного урахування умов і режимів їх експлуатації.

Разом із тим недостатньо дослідженими залишаються експлуатаційні методи підвищення довговічності, серед яких:

- правильна організація зберігання машин (оскільки 80–90 % часу вони перебувають на зберіганні, піддаючись корозії, що інтенсифікує процес зношування);
- оптимізація режимів роботи (експлуатація при певній вологості ґрунту та швидкості, коли абразивна здатність ґрунту є мінімальною);
- своєчасне очищення робочих органів від пожнивних решток, у соках яких містяться амінокислоти, здатні прискорювати корозійно-механічне зношування;
- регулярний технічний контроль і обслуговування.

Отже, підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин на основі комплексного підходу, який передбачає поєднання конструктивних, технологічних та експлуатаційних методів, із урахуванням реальних умов роботи є актуальним і важливим напрямом наукових досліджень для забезпечення стабільності аграрного виробництва.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ТА ЗНОСОСТІЙКОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИН

1.1 Забезпеченість ґрунтообробною технікою агропромислового комплексу та конструктивні особливості робочих органів ґрунтообробних машин

На початок 2025 року в Україні налічувалося понад 300 тисяч ґрунтообробних машин (табл. 1.1). Упродовж останніх років спостерігається стала тенденція до збільшення кількості таких машин у сільськогосподарських підприємствах. Машинобудівна галузь України має достатній виробничий потенціал для повного забезпечення агропромислового комплексу країни необхідною ґрунтообробною технікою [2].

Згідно з даними Державної фіскальної служби України [3], протягом останніх трьох років відзначається зниження обсягів імпорту ґрунтообробних машин та зростання їх експорту, що свідчить про підвищення конкурентоспроможності вітчизняної техніки на зовнішніх ринках. (табл. 1.2).

Таблиця 1.1.

Наявність сільськогосподарської техніки в сільськогосподарських
підприємствах на кінець 2025 року [4]

Найменування	Усього	У % до наявності на початок року
Плуги	49072	103,4
Культиватори	70100	102,0
Борони	181386	98,7
зокрема дискові	31707	106,5

Лідерами з виробництва ґрунтообробних машин в Україні є провідні машинобудівні підприємства, серед яких: ПАТ «Ельворті» [5], ТОВ «Завод «Оптикон» [6], ВАТ «Лозівський ковальсько-механічний завод» [7], ВАТ «Велес-Агро ЛТД» [8], ТОВ НВП «БілоцерківМАЗ» [9], ВАТ «Галещина машзавод» [10], ВАТ «Уманьферммаш» [11], ВАТ «Хмільниксільмаш» [12], Корпорація «Агро-Союз» [13].

Виробництво промислової продукції за видами за 2025 рік [18]

Найменування	Кількість виробленої продукції
Плуги	2917
Розпушувачі та культиватори	3967
Борони (крім дискових)	7267
Борони дискові	3261

Незважаючи на позитивні тенденції розвитку галузі, переважна більшість українських підприємств продовжує закуповувати за кордоном робочі органи, які безпосередньо взаємодіють із ґрунтовим середовищем, або ж імпортує матеріали для їх виготовлення — зокрема борвмісну сталь. Водночас частина виробників застосовує вітчизняні матеріали, серед яких найпоширенішою є сталь марки 65Г, що характеризується достатньою твердістю та пружністю для виготовлення робочих органів.

За даними Державної фіскальної служби України [3], найбільшими країнами-експортерами ґрунтообробної техніки до України є США, Німеччина, Швеція та Франція.

Світовими лідерами у виробництві ґрунтообробних машин і робочих органів є компанії Lemken [19], Weaving Machinery [20], Great Plains [21], John Deere [22], Case [23], Amazone [24], Väderstad [25], Kverneland [26], Kuhn [27], Kleine [28], Bellota та інші.

Існує значне різноманіття типів і видів робочих органів ґрунтообробних машин, які класифікують за такими ознаками, як геометрична форма, глибина обробітку, характер впливу на ґрунт, наявність або відсутність приводу тощо.

Під час дослідження процесів зношування робочих органів і пошуку шляхів підвищення їх довговічності та зносостійкості, доцільно поділяти їх на лемішно-лапові та дискові типи.

Слід зазначити, що характер зношування активних робочих органів суттєво відрізняється від неактивних, тому підходи до підвищення їх довговічності також повинні бути різними.

Цю проблему доцільно розглядати в межах окремого наукового дослідження. У даній роботі основну увагу зосереджено на трьох видах робочих органів ґрунтообробних машин, серед яких два належать до лемішно-лапових, а один — до дискових типів: леміш, стрілчаста лапа та вирізний дисковий робочий орган (рис. 1.1).

Співвідношення між геометричними параметрами робочих органів визначає їх тип, функціональне призначення та сферу застосування. До основних геометричних параметрів лемішно-лапових робочих органів, які не відображені на рис. 1.1, слід віднести товщину та кут загострення (рис. 1.2).

Під час виконання технологічних операцій з обробітку ґрунту робочі органи зазнають абразивного зношування, унаслідок чого змінюються їхні геометричні параметри (рис. 1.3). Це, у свою чергу, призводить до погіршення якості виконання технологічного процесу та збільшення тягового опору агрегату.

У процесі експлуатації змінюються не лише геометричні параметри, але й фізико-механічні властивості матеріалу, з якого виготовлено робочі органи ґрунтообробних машин.

За останні 50–60 років навантаження на робочі органи ґрунтообробних і посівних машин зросло приблизно у 4 рази, що зумовлено підвищенням робочих швидкостей і ущільненням ґрунту під дією важкої сільськогосподарської техніки [2, 4]. Унаслідок цього зростає інтенсивність зношування робочих органів і зменшується їхня надійність, тому питання підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин набуває особливої науково-практичної актуальності.

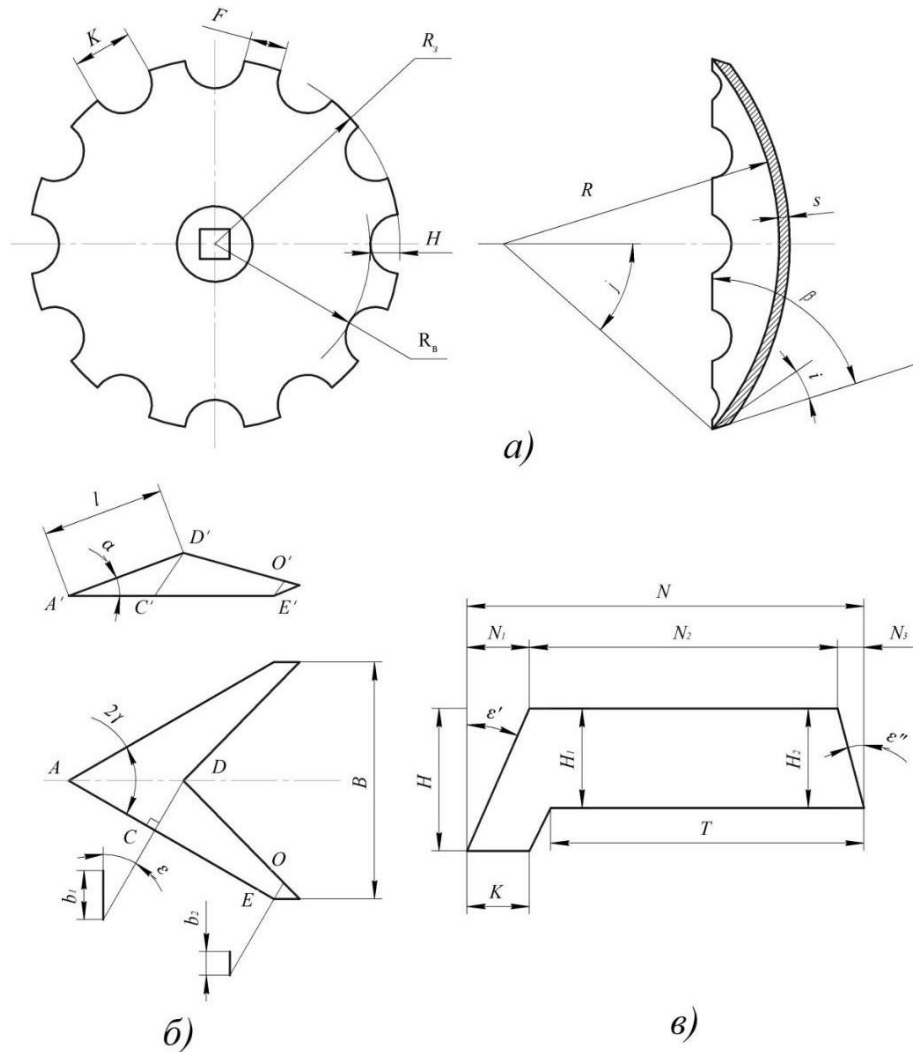


Рис. 1.1. Загальний вигляд та основні геометричні параметри робочих органів ґрунтообробних машин [3, 4], які використовували під час досліджень: а) – дисковий вирізний робочий орган; б) – стрілочаста лапа; в) – леміш; R_z – зовнішній діаметр диска; R_b – внутрішній діаметр диска; K – ширина впадини; F – ширина зуба; H – глибина впадини; s – товщина диска; i – кут загострення; j – кут, що визначає залежність між діаметром диска та радіусом кривини; R – радіус кривини диска; α – кут піднімання грудей лапи; ε – кут кришення; 2γ – кут між лезами; b_1, b_2 – ширина крила; B – ширина захвату лапи; l – довжина носка; N – довжина лемеша; H – ширина польового обрізу; H_1 – ширина лезової частини; H_2 – ширина обрізу з боку борозни; ε' – кут нахилу носка; ε'' – кут нахилу обрізу з боку борозни; T – довжина леза

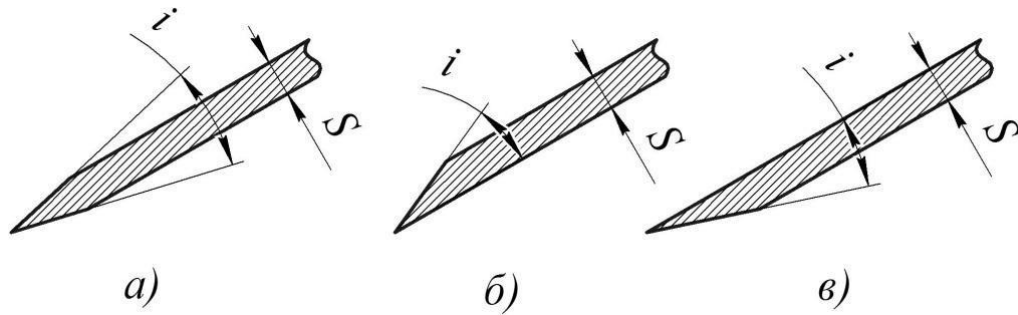


Рис. 1.2. Схема способів загострення: а), б), в) – відповідно двостороннє, верхнє та нижнє загострення; S – товщина робочих органів

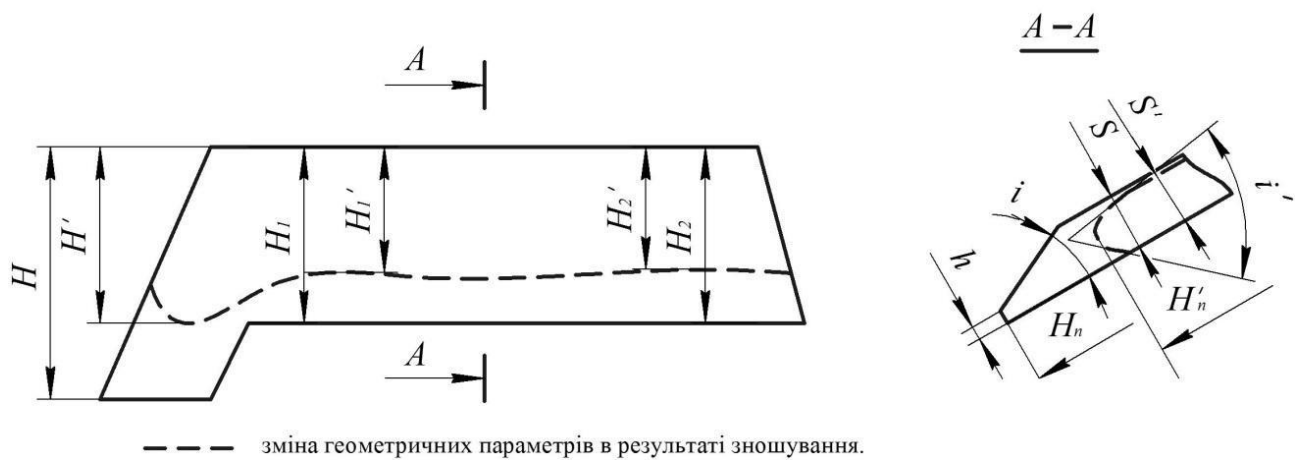


Рис. 1.3. Зміна форми лемеша в процесі виконання технологічної операції обробітку ґрунту: H , H_1 , H_2 , S , i , h – геометричні параметри нового лемеша, H' , H'_1 , H'_2 , S' , i' – геометричні параметри зношеного лемеша

1.2 Аналіз зношування робочих органів ґрунтообробних машин та процесів, які протікають у зоні фрикційного контакту

Підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин можливе лише за умови всебічного аналізу процесу їхнього зношування. Під час експлуатації робочі органи піддаються інтенсивному абразивному впливу ґрунту, який є агресивним середовищем. У зоні контакту одночасно відбуваються механічні, фізичні та хімічні процеси, і саме їх співвідношення визначає механізм та характер абразивного зношування.

Розуміння механізмів зношування будь-якого елемента трибосистеми неможливе без знання механізмів тертя. Перші спроби пояснення явищ тертя належать Леонардо да Вінчі [25]. У подальшому процеси тертя досліджували Г. Амонтон, Дж. Т. Деагюльє, Б. Томсон, Дж. П. Джоуль, У. Хардлі, Я. І. Френкель, Л. Прандтль, Дж. Томлінсон, Б. В. Дерягін, Г. Тейлор, Ф. Боуден, Д. Тейбор, І. В. Крагельський, Б. І. Костецький, Дж. Персон та інші.

На сьогодні домінантною є адгезійно-деформаційна або молекулярно-механічна теорія тертя, заснована на працях Ф. Боудена, Д. Тейбора, І. В. Крагельського та інших [26]. Автор зазначає, що дана теорія враховує лише макроскопічні аспекти тертя і не пояснює фундаментальні питання трибології. Основним недоліком є ігнорування атомних зв'язків як всередині елементів трибосистеми, так і між атомами різних елементів.

У випадку абразивного зношування переважними є механічні та молекулярні складові, тому взаємодією між атомами можна знехтувати.

Сучасне визначення абразивного зношування (abrasive wear) – це механічне зношування, що виникає внаслідок різальної або дряпальної дії твердих тіл або частинок у закріпленому чи вільному стані [27]. У сільськогосподарській техніці найбільше абразивному зношуванню піддаються робочі органи посівних і ґрунтообробних машин. Тому забезпечення їхньої зносостійкості на етапі проектування є актуальним завданням, вирішення якого можливе лише на основі адекватного розуміння механізмів абразивного зношування.

Механізм зношування напівзакріпленим абразивом відбувається переважно за рахунок пластичного відтискування та, меншою мірою, шляхом мікрорізання [23]. Підтвердженням одночасного протікання двох видів абразивного зношування є наявність на поверхні робочих органів слідів мікрорізання та полірованої поверхні (рис. 1.4).

За даними К. Хокірігави та К. Като, існують три різні режими абразивного зношування, які схематично представлені на рис. 1.5 [25].



Рис. 1.4. Типова поверхня тертя робочих органів ґрунтообробних машин (робочі органи фірми «Веднар FMT», напрацювання агрегату 130 га, Попільнянський район Житомирська область)

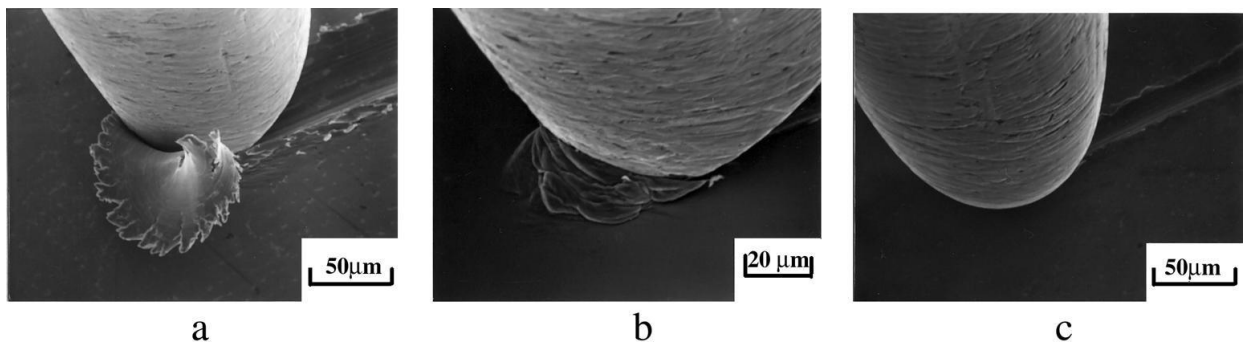


Рис. 1.5. За даними К. Хокірігави та К. Като, існують три різні режими абразивного зношування, які можна спостерігати за допомогою скануючої електронної мікроскопії (SEM) [25]:

1. Режим різання (рис. 1.5а) – характеризується утворенням чітких борозен на поверхні матеріалу в результаті різальної дії абразивних частинок. Приклад: сталевий штифт на латунній пластині.

2. Клиноутворювальний режим (рис. 1.5б) – внаслідок деформації матеріалу утворюються клиноподібні виступи та відколені частки. Приклад: сталевий штифт на пластині з нержавіючої сталі.

3. Режим оранки (рис. 1.5с) – поверхня матеріалу піддається деформації у вигляді борозен та розсіяного зміщення металу, що нагадує процес оранки. Приклад: сталевий штифт на латунній пластині.

Кожен із цих режимів впливає на інтенсивність та характер абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин і визначає доцільність вибору матеріалу та конструктивних рішень для підвищення їх довговічності. [62].

Саме так. Варто підкреслити, що реальні умови абразивного зношування в ґрунті значно складніші, ніж лабораторні режими, представлені на рис. 1.5:

- Абразивні частинки ґрунту можуть бути вільними або частково закріпленими, тобто вони мають різні ступені свободи (з одного, двох або трьох боків).
- Ступінь закріпленості частинки визначає характер контактних навантажень на поверхню робочого органу: різальні, відтискувальні або комбіновані.
- Це веде до одночасного протікання кількох механізмів абразивного зношування: мікрорізання, пластичне відтискування та змішане локальне тертя.
- Крім того, вплив має форма, розмір і твердість частинок ґрунту, а також швидкість руху робочого органу та вологість ґрунту, що змінює контактні умови і глибину проникнення частинок у матеріал.

Таким чином, лабораторні режими зношування лише частково відображають процеси, що відбуваються на робочих органах ґрунтообробних машин під час експлуатації. Для адекватного прогнозування довговічності та зносостійкості робочих органів необхідно враховувати комплексні взаємодії матеріалу, абразивних частинок та експлуатаційних умов.

Саме так. Ступінь закріпленості абразивних частинок дійсно є провідним фактором абразивного зношування, оскільки він визначає характер контактної взаємодії з поверхнею робочого органу:

- Високий ступінь закріпленості → частинка діє більш стабільно, з переважанням різального чи клиноутворювального зношування;
- Низький ступінь закріпленості → частинка вільна, переважає мікропластичне відтискування та дряпання, що призводить до менш передбачуваного і більш інтенсивного зношування.

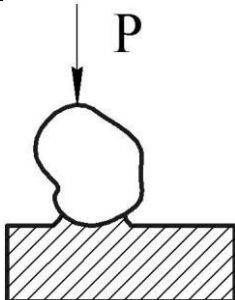
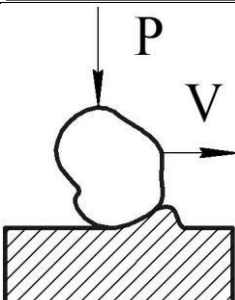
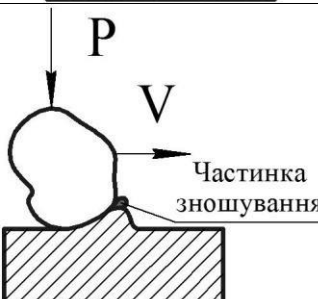
Приклад із дисковими боронами добре ілюструє цей ефект: передні ряди дисків зношуються швидше, бо абразивні частинки менш закріплені, а задні ряди отримують вже «попередньо оброблений» ґрунт, де частинки більш стабільні і зношування відбувається повільніше.

Щодо шкали ступеня закріпленості абразиву — її дійсно немає, і це ускладнює кількісну оцінку впливу закріпленості на зношування. Найчастіше роблять лише порівняльний аналіз за швидкістю зношування в експериментальних умовах, як у прикладі з дисковими боронами.

Молекулярно-механічна теорія, яку ти згадав, виділяє три етапи абразивного зношування, які узгоджуються із ступенем закріпленості частинок та характером дії на поверхню. Таблиця 1.3 якраз систематизує ці етапи.

Таблиця 1.3

Принципова схема руйнування матеріалів у процесі абразивного зношування

Етапи руйнування поверхні		Процеси
1. Проникнення абразивної частинки		1. Взаємодія абразивної частинки з поверхнею. 2. Локальне пружно-пластичне відтискування поверхневого шару металу з утворенням навалок.
2. Переміщення абразивної частинки		1. Зародження і збільшення мікротріщин. 2. Зародження і збільшення мікротріщин. 3. Відрив поверхневого шару від основної частини металу.
3. Відокремлення частинки зносу		1. Утворення валика з деформованого матеріалу. 2. Пластичне відтискування валика абразивною частинкою. 3. Зріз металу й утворення частинки зносу.

Насправді процес абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин не можна розглядати як строго послідовне протікання окремих етапів (як це пропонує молекулярно-механічна теорія в таблиці 1.3). У реальних умовах ґрунту перші та другі етапи руйнування матеріалу часто відбуваються одночасно, що підтверджується зміною ширини й глибини канавки на поверхні робочого органу.

Крім того, інші фактори можуть впливати на матеріал до початку “першого етапу”:

- Наклеп частинок, які не проникають у поверхню, може зміцнювати поверхню;
- Взаємодія з органічними сполуками ґрунту, наприклад із соками коріння, що містять гліцин чи аспіриноподібні сполуки, може прискорювати окислювальне розчинення сталі і знижувати абразивну зносостійкість.

Таким чином, класична схема руйнування у таблиці 1.3 є лише частковим або спрощеним випадком і не відображає повної картини процесів у реальних ґрунтових умовах.

Зазначені експериментальні дані про шорсткість лемешів підтверджують:

- При ґрунтах із дробними абразивними частинками поверхня залишається більш гладкою ($R_a = 0,8$ мкм),
- При ґрунтах із більш крупними абразивними частинками поверхня стає шорсткішою ($R_a = 1,13$ мкм).

Це чітко демонструє, що механізм зношування залежить від характеру абразивної маси, її фракційного складу, ступеня закріплення частинок, вологості ґрунту, а також умов експлуатації (швидкість, тиск) і фізико-механічних властивостей металу.

Крім того, у процесі експлуатації частинки абразиву за циклічної взаємодії з поверхнею поступово округлюються, що змінює коефіцієнт форми і, відповідно, зменшує агресивність їх дії.

Кількість вакансій (точкових дефектів) у тонкому приповерхневому шарі кристалічного тіла під час тертя може досягати $2,5 \times 10^{21}$ атомів/см³, тоді як у

звичайних умовах цей показник не перевищує 10^{18} – 10^{19} атомів/см³ [12]. Вплив наявності вакансій на процес зношування досі недостатньо вивчений, оскільки більшість дослідників зосереджуються на аналізі впливу лінійних та об'ємних дефектів на тертя та зношування. Утворення лінійних дефектів (дислокацій) істотно впливає на механізм зношування: у поверхневому шарі тертя їх кількість невелика, а головне накопичення дислокацій відбувається на певній глибині від поверхні. Високе скупчення дислокацій спричиняє появу тріщин, розташованих паралельно поверхні зношування, і при досягненні критичної довжини цих тріщин відбувається відокремлення продуктів зношування [12].

Експерименти Б. І. Костецького показали, що в зоні тертя металевих сплавів формуються структури, які відрізняються від структури основного елемента трибосистеми як за фізико-механічними властивостями, так і за хімічним складом [13]. Такі поверхневі шари, що утворюються під час тертя, називають вторинними або дисипативними структурами. На думку Л. М. Рибаківа, поверхневий шар, що бере участь у терті, являє собою новий, нестійкий стан речовини, віддалений від рівноваги, який виникає через потік вільної енергії та взаємодію з навколишнім середовищем, що призводить до формування нових типів організації матерії [14].

Під час тертя зовнішні впливи змінюють кристалічну решітку металу, що в результаті змінює властивості поверхневого шару. Такі зміни призводять до появи дефектів кристалічної решітки (точкових, лінійних, груп лінійних дефектів та їхніх кластерів), які, у свою чергу, прискорюють процеси дифузії. Першим, хто математично описав процес дифузії, був німецький учений А. Фік [16], виходячи з гіпотези, що в ізотропному середовищі кількість речовини Q , що переходить за одиницю часу через одиницю площі поперечного перерізу, пропорційна градієнту концентрації, вимірюваному по нормалі до цього перерізу (перший закон Фіка):

$$Q = -D \partial c / \partial x, \quad (1.1)$$

де D – коефіцієнт дифузії;

c – концентрація дифузійної речовини;

x – координата.

При описі процесу дифузії в багатокомпонентних металевих системах доцільно застосовувати узагальнений закон Фіка, згідно з яким дифузійний потік кожного компонента є лінійною функцією градієнтів концентрацій усіх компонентів, тобто [16]:

$$I_i = - \sum_k D'_{ik} \partial c_k / \partial x \quad (i=1, 2, \dots), \quad (1.2)$$

де D'_{ik} – коефіцієнт дифузії, є функцією c_k .

Процеси в стаціонарних системах добре вивчені, проте дифузія в динамічних трибологічних системах тертя досі залишається недостатньо дослідженою через значні експериментальні та теоретичні складнощі. Такі труднощі обумовлені тим, що структура металевих систем формується внаслідок складної сукупності процесів, що відбуваються під час тертя, і зумовлена високим рівнем напружень, впливом навколишнього середовища, значними об'ємними та поверхневими температурами і температурними градієнтами.

Переважає більшість експериментальних досліджень зосереджена на поверхневій дифузії металевих сплавів під час тертя двох металевих поверхонь із мастильним матеріалом та без нього, особлива увага приділялася мідним сплавам і сплавам Fe–Fe₃C. Дифузія металевих сплавів в абразивній масі (як елементі трибосистеми) практично не вивчена. Встановлення закономірностей цього процесу ускладнюється гетерогенною структурою ґрунту, різним хімічним складом типів ґрунтів та динамічністю дифузійних процесів на поверхні металевого сплаву. Дослідження дифузії речовин з ґрунту у поверхневі шари металевого сплаву ускладнене тим, що утворений локальний дифузійний шар швидко видаляється внаслідок механічної складової абразивного зношування. Видалення цього шару знижує зносостійкість утворених вторинних структур порівняно з основним металевим сплавом [17].

Коефіцієнт тертя є важливим показником фрикційного контакту двох тіл. У класичних і більшості сучасних досліджень [9–15] коефіцієнт тертя між

грунтом і поверхнею робочих органів розглядають переважно з механічної точки зору. Такий однобічний підхід не дозволяє повноцінно описати процеси, що протікають на поверхні тертя. Врахування всіх факторів під час визначення коефіцієнта тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин сприятиме більш якісному проектуванню сільськогосподарських машин.

Для аналізу фрикційної взаємодії двох тіл слід розглядати спершу фрикційні властивості елементів трибосистеми, у даному випадку – ґрунту та поверхні робочого органу ґрунтообробних машин. Особливістю цієї трибосистеми є те, що для робочого органу враховується лише поверхня, тоді як для ґрунту – весь об'єм, оскільки під час функціонування системи «робочий орган – ґрунт» відбувається постійне перемішування ґрунту, і взаємодіяти з поверхнею робочого органу можуть частини ґрунту, які на початку функціонування знаходились на певній відстані від поверхні.

Фрикційні властивості ґрунту проявляються через силу опору ковзанню тіла (робочого органу або опорної поверхні) відносно поверхні ґрунту – зовнішнє тертя, а також через опір ковзанню однієї частини ґрунту відносно іншої – внутрішнє тертя. У класичних працях для визначення сили зовнішнього тертя ґрунту пропонується використовувати закон Амонтона–Кулона.

$$F_T = fN = Ntg\varphi \quad (1.3)$$

Як відомо, наведена залежність не враховує молекулярну складову тертя, яка є суттєвою і повинна обов'язково враховуватися при проектуванні робочих органів ґрунтообробних машин, адже саме молекулярна складова відіграє значну роль у процесі взаємодії ґрунтової маси з робочою поверхнею [17]. З огляду на це, математичне моделювання процесів у зоні фрикційного контакту твердого тіла та ґрунту з урахуванням усіх фізичних явищ і процесів є актуальним і становить значний інтерес для сільськогосподарського машинобудування.

Протягом року робочі органи ґрунтообробних машин експлуатуються відносно короткий час, тоді як неробочий період становить близько 90 % (за

даними корпорації «Сварог Вест Груп»). У сільськогосподарському виробництві застосовуються такі способи зберігання ґрунтообробних машин: на відкритих майданчиках (асфальтовані, гравійні, бетонні, ґрунтові або трав'яні покриття); під навісом (з бетонним, асфальтованим або гравійним покриттям); у закритих приміщеннях (опалювальних і неопалювальних, з бетонною чи асфальтованою підлогою). Останній варіант застосовується рідше через потребу у додаткових капіталовкладеннях.

Під час зберігання робочі органи піддаються впливу атмосферної корозії, і після повернення до експлуатації інтенсивність їхнього зношування значно зростає. Тому захист від корозії слід розглядати як важливий чинник підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин.

Висновки

Ґрунтообробні машини відіграють ключову роль у структурі машинно-тракторних парків сучасних сільськогосподарських підприємств. Надійність роботи цих машин та якість виконання операцій обробітку ґрунту безпосередньо визначаються довговічністю та зносостійкістю їхніх робочих органів.

Під час проєктування та серійного виробництва робочих органів ґрунтообробних машин зазвичай не враховуються ґрунтово-кліматичні умови майбутньої експлуатації, що призводить до неефективного використання потенційного ресурсу матеріалу робочого органу та підвищення витрат на обслуговування.

Наразі не встановлено, як ґрунтово-кліматичні умови, режими експлуатації та умови зберігання впливають на довговічність і зносостійкість робочих органів ґрунтообробних машин.

Відсутні чіткі рекомендації для сільськогосподарських підприємств щодо оптимальних режимів експлуатації та методів зберігання ґрунтообробних машин, які могли б забезпечити підвищення довговічності та зносостійкості їхніх робочих органів.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИНКОМПЛЕКСНИМ ПІДХОДОМ АДАПТАЦІЇ ЇХ ЗНОСОСТІЙКОСТІ

2.1. Методологічні основи та програма досліджень

На сучасному етапі розвитку ґрунтообробної техніки накопичено значний масив наукових і практичних даних, що стосуються підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів. Переважно створення робочих органів із покращеними показниками надійності базується на конструктивних і технологічних підходах, орієнтованих на конкретний тип робочого органа та спрямованих на усунення проблем у визначених умовах експлуатації. Встановлено, що такі підходи не одержали широкого впровадження на практиці, оскільки їх неможливо ефективно застосувати до інших типів робочих органів або за зміни ґрунтово-кліматичних умов чи режимів роботи.

З огляду на поглиблення об'єктивної суперечності між наявним рівнем наукових знань щодо забезпечення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин і виробничими потребами виникає необхідність у вирішенні нових наукових і прикладних задач. Подолання цієї проблеми має здійснюватися на основі комплексного підходу, що поєднує технологічні й конструктивні методи з урахуванням умов експлуатації та передбачає формування науково обґрунтованої системи їх використання. Процес розв'язання зазначеної проблеми реалізовувався поетапно відповідно до запропонованої схеми, наведеної на рис. 2.1.

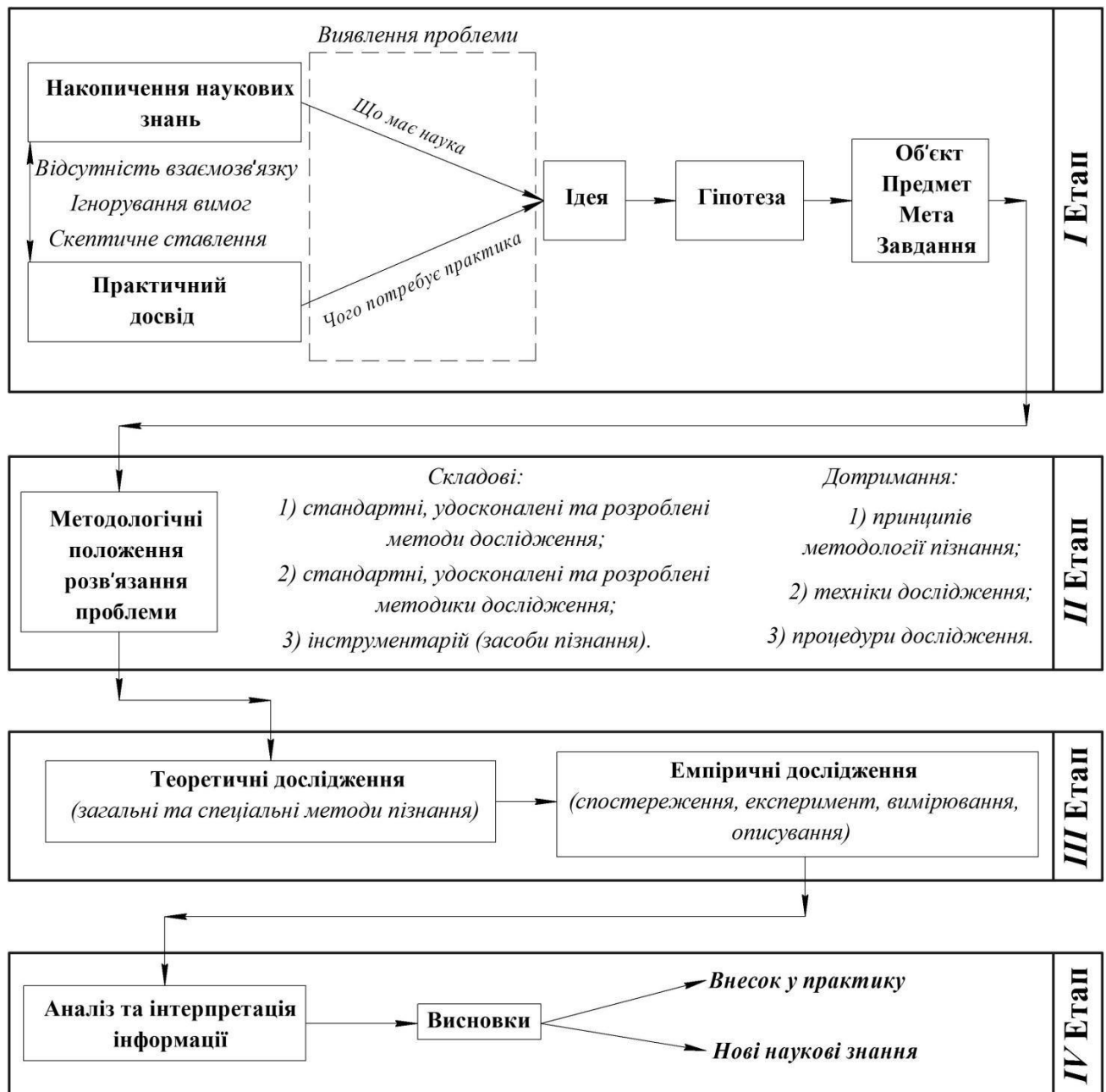


Рис. 2.1. Етапи вирішення проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин

Відповідно до поставлених у розділі 1 завдань та визначених етапів розв'язання проблеми підвищення довговічності й зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин, програма досліджень передбачає виконання таких етапів:

- у лабораторних умовах дослідити механічні, фізико-хімічні та триботехнічні характеристики матеріалів, що застосовуються для виготовлення робочих органів ґрунтообробних машин;

коефіцієнт тертя «рослинні рештки – поверхня робочого органа» та «грунт – поверхня робочого органа»; а також процеси самоорганізації ґрунтового середовища;

- у лабораторно-польових умовах визначити: вплив рослинних решток на зношувальну здатність ґрунтової маси; коефіцієнт форми абразивних частинок ґрунту; рівень закріплення абразивних елементів у ґрунті та його вплив на абразивну дію; вплив попереднього корозійного ураження на інтенсивність зношування робочих органів; вплив абразивного зношування на швидкість корозійних процесів робочих органів ґрунтообробних машин;
- в умовах експлуатації встановити: вплив експлуатаційних умов і режимів роботи на зносостійкість та довговічність робочих органів; особливості самозагострювання та рівномірності зношування робочих органів ґрунтообробної техніки.

Для опрацювання отриманих результатів були застосовані аналітичний, графічний і графоаналітичний методи. Планування експериментів та оброблення даних здійснювали згідно з типовими методиками [9].

2.2 Фізико-математична модель системи «робочий орган – ґрунт»

У трибологічній системі одночасно перебігає значна кількість різноманітних процесів і явищ. У прикладних дослідженнях їх, як правило, розглядають окремо, що не дає змоги комплексно пояснити їхню природу. Основні процеси та явища, які відбуваються у динамічному режимі в трибосистемі «робочий орган – ґрунт», наведені в роботі [8]. Для об'єктивного їх аналізу необхідне застосування системного підходу, що забезпечує впорядкування та спрощення міркувань [9].

Перші спроби застосування системного аналізу в трибології були здійснені Х. Чихосом у праці «Tribology – a system approach to science and technology of friction, lubrication and wear» (на пострадянському просторі ця праця відома під назвою «Системный анализ в трибонике» через помилковий переклад) [280]. Проте існуючі напрацювання щодо системного аналізу трибосистем не можна

повністю використовувати для трибосистеми «робочий орган – ґрунт», оскільки, як зазначено в [27], вона має низку специфічних особливостей, що не дозволяють повністю віднести її до запропонованих класифікацій.

Для проведення системного аналізу трибосистеми «робочий орган – ґрунт» необхідно виконати такі кроки:

- побудувати фізико-математичну модель трибосистеми у статичному та динамічному станах, здатну об'єктивно описувати всі процеси, явища та субпроцеси;
- сформулювати феноменологічну модель процесів, що відбуваються в трибологічній системі;
- проаналізувати індивідуальні параметри елементів та агрегатні властивості трибосистеми;
- математично описати перетворення вхідних параметрів X у вихідні Y ;
- визначити основні критерії ефективного функціонування трибосистеми «робочий орган – ґрунт», а також її обмеження та умови роботи.

Використання системного підходу під час моделювання трибосистеми «робочий орган – ґрунт» дає змогу:

- об'єднати знання з різних наукових напрямів (фізики, хімії, математики, трибології, теорії систем, теорії керування, матеріалознавства, ґрунтознавства тощо);
- значно зменшити обсяг трудомістких лабораторних, стендових та експлуатаційних досліджень, необхідних для прийняття обґрунтованих рішень щодо підвищення зносостійкості складових трибосистеми.

Згідно з визначенням, зміни структури трибомеханічної системи можуть проявлятися в таких формах [20]:

1. **Утворення або зникнення елементів системи.** Відомо [2], що трибосистема «робочий орган – ґрунт» складається з трьох основних компонентів: навколишнього середовища, робочого органа та ґрунту. У процесі її роботи може з'являтися додатковий елемент — змащувальний прошарок води між ґрунтом і робочим органом. Така ситуація характерна для перезволожених

ґрунтів (для піщаних і супіщаних при вологості близько 20%, для суглинків і глин — 30% [38]). Виникнення четвертого елемента часто порушує необхідні умови перетворення вхідних величин X у вихідні Y .

2. **Зміна взаємозв'язків між елементами.** У трибосистемі «робочий орган – ґрунт» досить часто спостерігається перехід від абразивного механізму зношування до ударно-абразивного, абразивно-окиснювального та інших. На різних ділянках поверхні одного робочого органа одночасно можуть проявлятися різні механізми зношування.

3. **Зміна властивостей елементів.** Нормальне функціонування системи передбачає змінність властивостей ґрунту — твердості, ступеня закріплення абразивних частинок, структури тощо. Зміна характеристик робочих органів є небажаною, але неминучою. Під час роботи відбуваються зміни геометричних параметрів та топографії поверхні; хімічного складу поверхневого шару; міцнісних властивостей; маси робочих органів.

Для зниження негативних процесів, пов'язаних зі зміною властивостей робочих органів у трибосистемі «робочий орган – ґрунт», необхідно на основі системного аналізу створити теоретичну модель її функціонування.

Важливою характеристикою будь-якої моделі є ступінь її відповідності реальному об'єкту. За цією ознакою моделі поділяються на ізоморфні й гомоморфні. У випадку складних трибосистем доцільно застосовувати ізоморфні моделі, оскільки вони містять ключові параметри об'єкта й можуть фактично його замінювати.

Метою фізико-математичного моделювання трибосистеми «робочий орган – ґрунт» є встановлення функціональних залежностей зношування робочих органів ґрунтообробних машин:

$$I = f(V, p, E, H_m, L, G_z, A, K_\phi, P(\Delta H), C_v, W, H_a, P_z, \Psi, f_t), \quad (2.1)$$

де: I – інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин, $\text{м}^3/\text{м}$, $\text{г}/\text{м}$, $\text{мм}/\text{м}$; E – модуль пружності матеріалу робочих органів, $\text{Н}/\text{м}^2$; f_t – коефіцієнта тертя; V – швидкість переміщення робочих органів відносно

грунту, м/с; p – тиск на поверхні робочих органів, Н/м; H_m – мікротвердість поверхні робочих органів, Па; L – шлях тертя, м; G_3 – ступінь закріплення абразивних частинок; $P(\Delta H)$ – імовірність виникнення ударного навантаження; C_V – відсотковий вміст кварцового піску в ґрунті (механічний склад ґрунту); Ψ – кислотність ґрунту; W – вологість ґрунту, %; H_a – мікротвердість абразиву; P_c – твердість ґрунту, кг/м²; A – середній розмір абразивних частинок, м; K_ϕ – коефіцієнт форми абразивних частинок.

Трибосистема «робочий орган – ґрунт» та відповідна їй модель формуються з певного набору елементів, структура яких подана на рис. 2.2. [2].

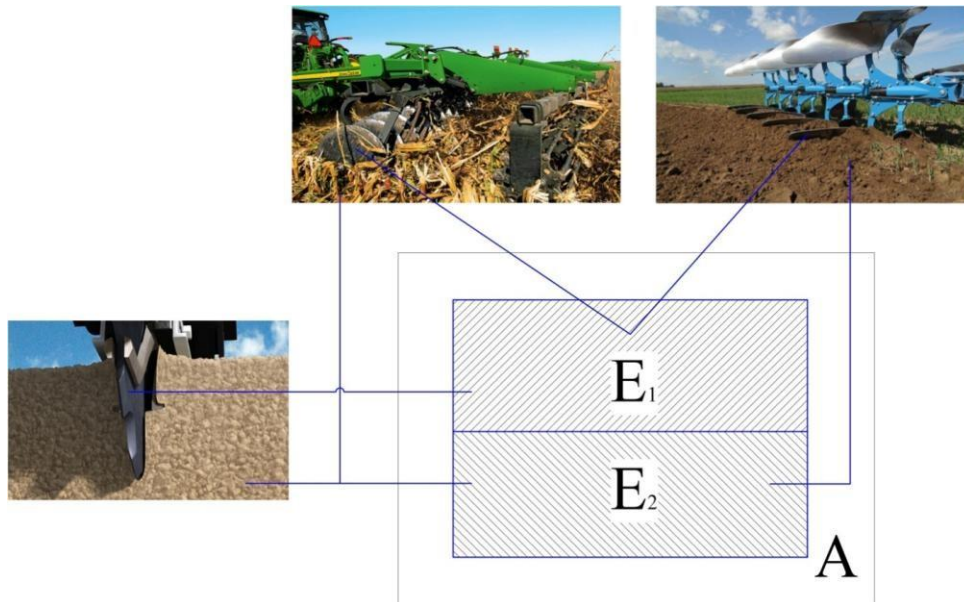


Рис. 2.2. Трибологічна система та її модель: А – навколишнє середовище; E1 – робочий орган ґрунтообробних машин; E2 – ґрунт

Відомо, що властивості складових трибосистеми визначають особливості її структури [6]. У випадку трибосистеми «робочий орган – ґрунт» елементи суттєво різняться за фізико-механічними й хімічними характеристиками.

Основні особливості трибосистеми «робочий орган – ґрунт» такі:

1. інтенсивному зношуванню підлягає лише один її елемент — робочий орган;
2. джерелом проміжного середовища виступає другий елемент — ґрунт, за умови наявності певного рівня вологості;

3. ґрунт як складова трибосистеми є неоднорідним і включає різноманітні компоненти: фізичний пісок, фізичну глину, рослинні рештки, живі організми, повітря, воду, солі, кислоти тощо, кожен з яких впливає на інтенсивність зношування робочих органів;

4. у деяких випадках трибосистему доцільно поділяти на дві підсистеми, оскільки механізми зношування різних ділянок поверхні робочого органа можуть значно відрізнятися (залежно від ступеня закріплення абразивних частинок у ґрунті).

Згідно з поданою моделлю, взаємодія елементів E1 та E2 відбувається за відсутності мастильного середовища. Проте в суглинкових та глинистих ґрунтах після досягнення критичної вологості на поверхні робочого органа виникає шар вільної води, який виконує роль змазки [38]. Це підтверджується експериментальними даними [3, 8], що свідчать про істотне зменшення коефіцієнта тертя в супіщаних ґрунтах при вологості 20%, а у важких суглинках і глинах — при 30%. За таких умов здійснення технологічного обробітку ґрунту вже неможливе. Саме тому трибосистеми з наявністю мастильної фази (води) у дослідженні не розглядалися.

Взаємний вплив елементів трибосистеми проявляється лише під час її функціонування, тобто в динамічному стані. У статичному режимі така взаємодія відсутня. Сукупність процесів, що відбуваються в динамічному стані трибосистеми, наведено на рис. 2.3. До вихідних результатів трибосистеми належать побічні процеси (z), такі як наклеп поверхні, старіння, термомеханічні та електричні ефекти тощо.

Як показано, найбільш інтенсивному впливу в системі піддається елемент 1 (робочий орган), на який діє елемент 2 (ґрунт). Масштаб таких процесів визначається величиною вхідних параметрів (V, P) і початковими характеристиками елементів.

На фундаментальному рівні мету існування трибосистеми «робочий орган – ґрунт» можна трактувати як процес трансформації. Основний вхід (X) системи — це рух і робота, які виконує елемент E1, а основний вихід —

структурні зміни елемента E_2 . В реальних умовах виникає також значна кількість побічних виходів, здебільшого небажаних.

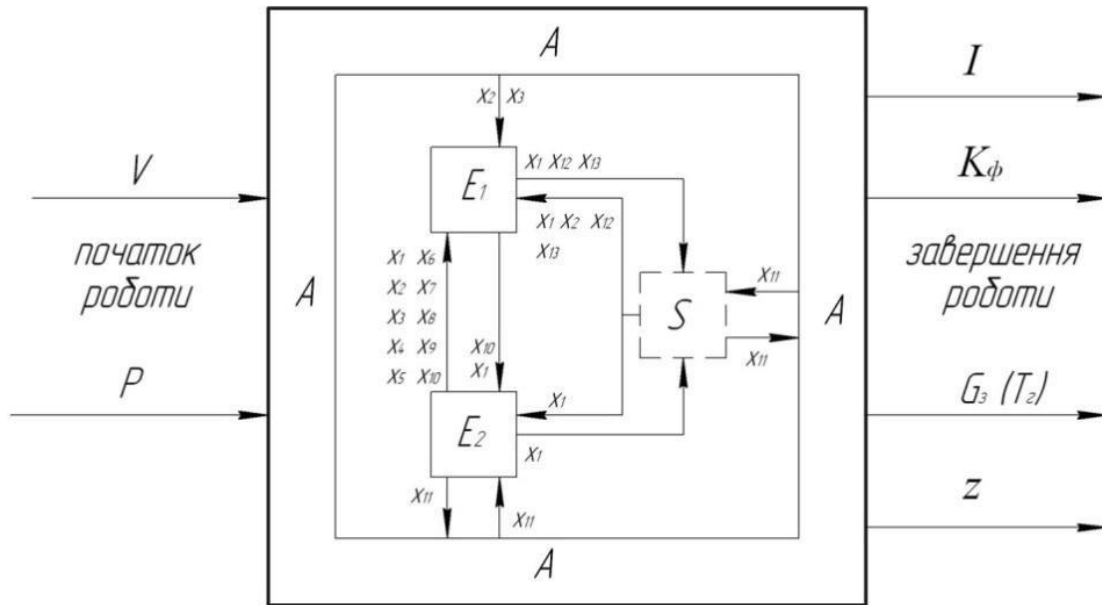


Рис. 2.3. Структурно-логічна схема системи «робочий орган – ґрунт» у динамічному стані: x_1 – адгезія; x_2 – корозія; x_3 – окиснення; x_4 – пружна деформація; x_5 – пластична деформація; x_6 – мікрорізання; x_7 – дряпання; x_8 – відривання; x_9 – руйнування поверхні тертя; x_{10} – фазові та структурні перетворення; x_{11} – дифузія; x_{12} – адсорбція; x_{13} – хемосорбція; V – відносна швидкість переміщення; P – тиск на поверхні тертя; I – інтенсивність зношування; G_3 – ступінь закріплення абразивних частинок; P_c – твердість ґрунту; K_ϕ – коефіцієнт форми абразивних частинок; z – супутні процеси; A – довкілля; E_1, E_2 – елементи системи; S – мастильний матеріал (вода)

З роботи [26] відомо, що енергетичний баланс трибосистеми можна представити залежністю:

$$\sum E_x = \sum E_y + \sum E_z + \sum E_s + \sum E_t, \quad (2.2)$$

де E_x – підведена енергія;

E_y – корисна енергія (для трибосистеми «робочий орган – ґрунт» корисна енергія витрачається на формування структури елемента E_2);

E_z – витрати системи;

E_s – накопичення енергії (деформація);

E_t – теплота.

Теплота, яка утворюється під час взаємодії елемента E_1 з елементом E_2 , досить швидко передається другому елементу. Це зумовлено відносно великим об'ємом E_2 порівняно з E_1 та значною різницею температур між елементами і навколишнім середовищем.

Оскільки масовому зношуванню підлягає лише один елемент трибосистеми, масовий баланс можна записати у вигляді такого рівняння:

$$\sum m = (\sum m_{E_1} - \sum m_{E_{1a}} - \sum m_{E_{1c}}) + (\sum m_{E_2} + \sum m_{E_{1a}} + \sum m_{E_{1c}}) \quad (2.3)$$

де m – маса трибосистеми;

m_{E_1} – маса елемента E_1 до виконання роботи;

$m_{E_{1a}}$ – маса матеріалу елемента E_1 , яка переноситься в елемент E_2 під час виконання роботи;

$m_{E_{1c}}$ – маса всіх продуктів хімічної реакції елемента E_1 , яка переноситься в елемент E_2 під час виконання роботи;

m_{E_2} – маса елемента E_2 до виконання роботи.

Сума $(\sum m_{E_{1a}} + \sum m_{E_{1c}})$ характеризує величину інтенсивності зношування й залежить від умов функціонування системи (V, p) , властивостей елемента E_1 (E, H_m , – хімічний склад матеріалу), властивостей елемента E_2 ($G_z, A, K_\phi, P(\Delta H), C_v, W, H_a, P_z, \Psi$), коефіцієнта тертя матеріалу елемента E_1 по елементові $E_2(f_T)$, а також від шляху тертя (L).

Зазвичай дослідники намагаються підвищити зносостійкість, зосереджуючись лише на вдосконаленні властивостей робочої поверхні елемента E_1 . Проте ефективніше вирішувати цю задачу шляхом застосування системного аналізу трибосистеми «робочий орган – ґрунт».

Піонером використання системного підходу в трибології є німецький вчений Х. Чихос. Проте раніше проведений системний аналіз існуючих трибосистем не можна повністю перенести на трибосистему «робочий орган –

ґрунт», оскільки вона має специфічні особливості, що не підпадають під відому класифікацію [2].

2.3. Наукові основи досягнення ефекту самозагострювання та рівностійкості зношування робочих органів ґрунтообробних машин

Алгоритм послідовної розробки теоретичних основ забезпечення самозагострювання різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин у системному вигляді представлено на рис. 2.4.

З рис. 2.4 видно, що мету дослідження досягнуто шляхом розв'язання таких завдань:

- визначення вихідних даних для оптимізації процесу самоорганізації (самозагострювання) робочих органів;
- встановлення цільових функцій.

Під час аналізу вихідних даних та цільових функцій сформовано критерії оптимізації. Після розробки локальних методів оптимізації цих критеріїв розглядалася задача синтезу оптимальної конструкції самозагострювальних різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин, що є кінцевим результатом теоретичних досліджень.

Етапи системного аналізу та оптимізації були вивчені детально, тоді як синтез розглядався з позиції загального підходу.

Форма різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин має забезпечувати ефективне виконання технологічних операцій з мінімальним опором.

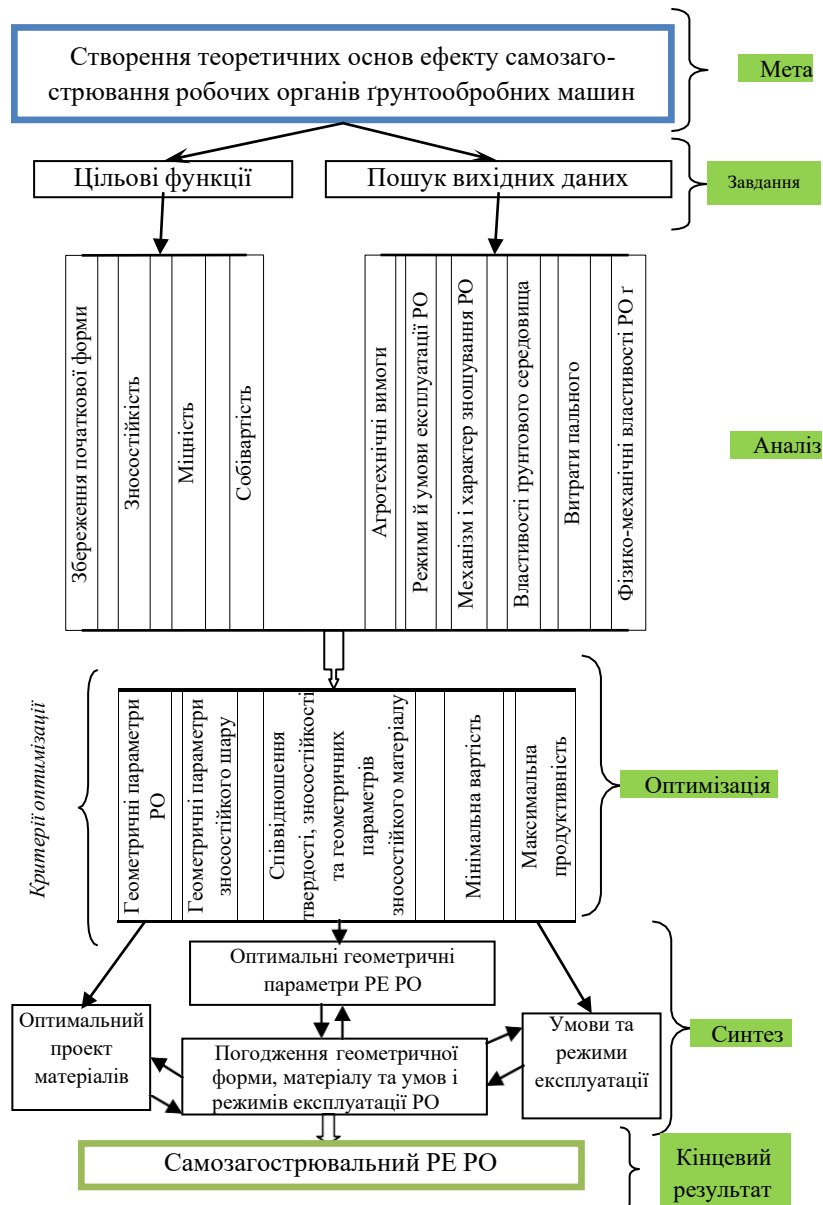


Рис. 2.4. Алгоритм розробки самозагострювальних різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин: РО – робочі органи; РЕ – різальні елементи [14]

Визначення форми твердого тіла, яке чинить опір потоку, є класичною задачею варіаційного числення [15]. Розв'язавши рівняння Ейлера, можна визначити оптимальний кут різання ґрунту:

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{3}{2} f \pm \sqrt{\frac{9}{4} f + 2} \quad (2.4)$$

де f – коефіцієнт тертя ґрунту по сталі.

Проведені автором дослідження [14] показали, що оптимальний кут різання α повинен перебувати в межах $39,3 \dots 52,7^\circ$. Це добре узгоджується з результатами А. Ш. Рабіновича, який встановив, що при зношуванні різальних елементів кут на лицевій поверхні леміша нахиляється до горизонту під кутом $48 \dots 52,5^\circ$ [11].

Вказані розрахунки враховують лише один коефіцієнт тертя — ковзання. Проте під час взаємодії робочого органа з ґрунтом на його поверхні відбуваються три види тертя: ковзання, кочення та кочення з проковзуванням. Якщо абразивні частинки ґрунту добре закріплені, переважає тертя ковзання. У пухких ґрунтах перевага тертя ковзання не настільки виражена, тому ігнорувати інші види тертя недоцільно. Проектуючи робочі органи ґрунтообробних машин, цю особливість слід обов'язково враховувати.

Теоретичне визначення оптимального кута різання для різних станів ґрунту є складним завданням. Тому проведено аналіз зношених робочих органів ґрунтообробних машин, які експлуатувалися на різних типах ґрунтів і в різних станах (табл. 2.1), та визначено кути, що утворюються в різальній частині (рис. 2.5, 2.6 і 2.7).

Таблиця 2.1 Кут загострення, який утворюється в результаті зношування серійних монометалевих робочих органів ґрунтообробних машин (матеріал дискового робочого органу та стрілчатої лапи — сталь 65Г, лемеша — сталь Hardox 500)

Робочий орган	Кут загострення, град					
	Супіщаний	Супіщаний (пухкий ґрунт)	Середній суглинок	Середній суглинок (пухкий ґрунт)	Глина легка	Глина легка (пухкий ґрунт)
Леміш (лезова частина)	26...35	-	32...48	-	52...70	-
Долото леміша (змінне)	47...51	-	49...57	-	58...79	-
Стрілчата лапа (крила, перший ряд)	17...21	16...19	23...25	22...23	31...38	27...31
Дисковий робочий орган (тип «ромашка», перший ряд)	27...31	26...30	33...35	30...34	36...41	32...36

Кут загострення, що виникає внаслідок зношування (природний кут), змінюється вздовж всієї довжини леза (рис. 2.5 та 2.6). Це пояснюється різною величиною тиску абразивної маси на окремі ділянки леза. Розробляючи самозагострювальні різальні елементи робочих органів, необхідно враховувати цю закономірність (рис. 2.7) при визначенні оптимального співвідношення між параметрами зносостійкого шару та основного металу.



Рис. 2.5. Формоутворення різального елемента змінного долота леміша під час експлуатації на супіщаних ґрунтах



Рис. 2.6. Формоутворення різального елемента леза леміша під час експлуатації на легкій глині



Супіщаний	35°	33°	27°	26°
Середній суглинок	48°	37°	32°	32°
Глина легка	58°	54°	51°	49°

Рис. 2.7. Зміна кута загострення різального елемента лезової частини леміша під час експлуатації на різних типах ґрунтів: точки А, В, С, D – місця проведення замірів

В результаті роботи на піщаних і супіщаних ґрунтах встановлено, що різальні елементи робочих органів ґрунтообробних машин, виготовлені з матеріалу без зносостійкого покриття (одношарові), здатні до самозагострювання (рис. 2.5). На більш важких ґрунтах (суглинках і глинах) спостерігається затуплення різальних елементів (рис. 2.6).

Для інших типів робочих органів ґрунтообробних машин спостерігається аналогічна закономірність: кут загострення змінюється по довжині різальної кромки залежно від типу ґрунту.

Досягнення форми природного зношування не завжди призводить до зменшення тягового опору агрегату та відповідно до скорочення витрат пального (рис. 2.8). Для об'єктивної оцінки впливу процесу самоорганізації серійних робочих органів результати подані у відсотках, оскільки обробіток ґрунту здійснювався різними агрегатами. За 100% прийнято витрати пального при експлуатації агрегату з новими робочими органами.

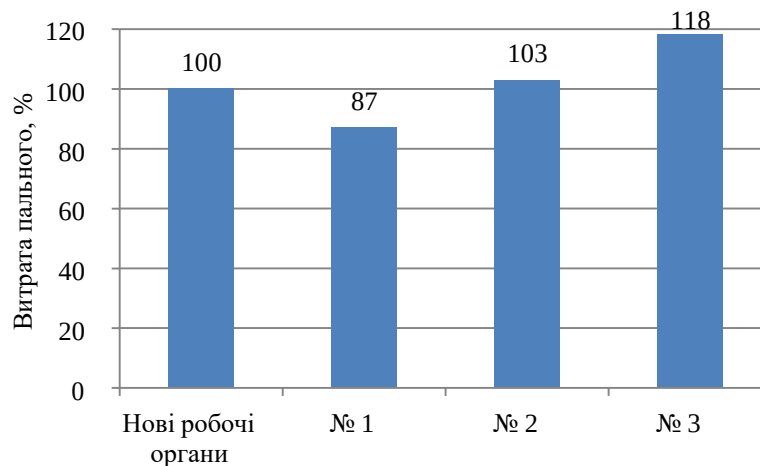


Рис. 2.8. Витрата пального в початковій формі та при досягненні природної форми зношування під час експлуатації одношарових лемішів зі сталі Hardox 500: № 1 – супіщані ґрунти; № 2 – суглинкові ґрунти; № 3 – легка глина

Як видно з рис. 2.8, на піщаних і супіщаних ґрунтах процес зношування сприяє самоорганізації робочих органів, що забезпечує самозагострювання і водночас зменшує витрати пального під час обробітку ґрунту. На суглинкових і глиняних ґрунтах природна форма зношування призводить до затуплення лезової частини та збільшення витрат пального. Тому розробка самозагострювальних різальних елементів робочих органів для цих ґрунтів є особливо актуальною. Для піщаних і супіщаних ґрунтів слід зосередитися на підвищенні зносостійкості збереженням природної форми зношування, а для суглинкових і глиняних – на впливі на процес зношування з можливістю досягнення ефекту самозагострювання.

При проектуванні самозагострювальних різальних елементів ключовим показником є співвідношення зносостійкості матеріалів робочих органів та їхніх геометричних характеристик.

Для забезпечення ефекту самозагострювання та рівномірності зношування робочих органів співвідношення товщини основного металу й зносостійкого шару має відповідати значенням, наведено у відомих роботах [5, 16, 17]. Зокрема, для більшості ґрунтів рекомендоване значення цього співвідношення становить $\omega = 1,5$. На основі аналізу зношених робочих органів, даних попередніх досліджень та практичного досвіду визначено експериментальний критерій ω для різних типів робочих органів ґрунтообробних машин з урахуванням умов експлуатації (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 Критерій самозагострювання ω (визначений експериментально)

Ґрунт	Стан ґрунту	Критерій ω		
		Леміш	Стрілчата лапа культиватора	Дисковий робочий орган
Супіщаний	Поле після збирання с/г культур	1,6...1,7	1,5...1,6	1,9...2,0
	Пухкий ґрунт	-	1,3...1,4	1,3...1,4
Середній суглинок	Поле після збирання с/г культур	1,5...1,6	1,4...1,5	1,9...2,0
	Пухкий ґрунт	-	1,25...1,35	1,4...1,5
Глина легка	Поле після збирання с/г культур	1,5...1,6	1,35...1,45	1,8...1,9
	Пухкий ґрунт	-	1,2...1,3	1,45...1,55

Для лемішів не визначали критерію самозагострювання ω під час експлуатації на пухких ґрунтах, оскільки вони не застосовуються в таких умовах.

Зі зменшенням абразивності ґрунту та ступеня закріплення абразивних частинок у ньому спостерігається зниження значення критерію ω для всіх типів робочих органів ґрунтообробних машин (табл. 2.2).

Для дискових робочих органів значення критерію ω є суттєво більшим, що зумовлено, перш за все, наявністю динамічних навантажень під час роботи на твердих ґрунтах. Цей висновок підтверджується значним зменшенням ω при зниженні ступеня закріплення абразивних частинок у ґрунті та, відповідно, його твердості.

У разі наявності кам'янистих включень у ґрунті значення критерію ω слід значно збільшувати, щоб запобігти обломлюванню різальних елементів робочих органів.

У класичному розумінні співвідношення, що визначає критерій ω , повинно відповідати залежності, наведеної в роботі [17], по всій поверхні різальних елементів робочих органів. Однак ця залежність не повністю відображає процеси самоорганізації робочих органів, оскільки не враховує особливості зношування окремих складових частин. Співвідношення має забезпечувати не лише можливість самозагострювання різальних елементів, але й рівномірність зношування робочих органів.

Запропоновані співвідношення між зносостійкістю та товщиною нанесених зносостійкого та несучого шарів базуються на експериментальних дослідженнях характеру зношування робочих органів ґрунтообробних машин залежно від абразивних властивостей ґрунту та режимів експлуатації.

Зони робочих органів, на які запропоновано поділити поверхню для забезпечення самоорганізації, підвищення довговічності та підтримання якісного обробітку ґрунту протягом усього терміну експлуатації, показані на рис. 2.9.

Рис. 2.9 ілюструє зони нанесення зносостійкого покриття для досягнення ефекту самозагострювання та рівномірності зношування: 1 – зона з максимальною інтенсивністю зношування; 2 – зона з меншою інтенсивністю зношування.

Такий поділ не завжди оптимальний. Наприклад, леміш плуга доцільніше поділити на чотири зони, проте це ускладнює або навіть робить неможливим

нанесення зносостійкого шару в умовах ремонтних майстерень аграрних підприємств.

Зону 2 для лемішів і культиваторних лап можна зміцнювати точково для формування зубчастої поверхні. Така форма сприяє якісному виконанню технологічної операції та зменшує тяговий опір на 3,2...6,4%, проте знижує зносостійкість на 8,1...14,5%.

При використанні лемішів зі змінним долотом зона 1 не піддається зміцненню.

Для досягнення ефекту самозагострювання різальних елементів та рівномірності зношування робочих органів необхідно, щоб параметри зносостійкого шару відповідали наступному співвідношенню:

$$\chi = \frac{\varepsilon_{1з.} h_{1з.}}{\varepsilon_{2з.} h_{2з.}}, \quad (2.5)$$

де $\varepsilon_{1з.}$ – зносостійкість зміцнювального покриття зони 1; $\varepsilon_{2з.}$ – зносостійкість зміцнювального покриття зони 2; $h_{1з.}$ – товщина зміцнювального покриття зони 1; $h_{2з.}$ – товщина зміцнювального покриття зони 2.

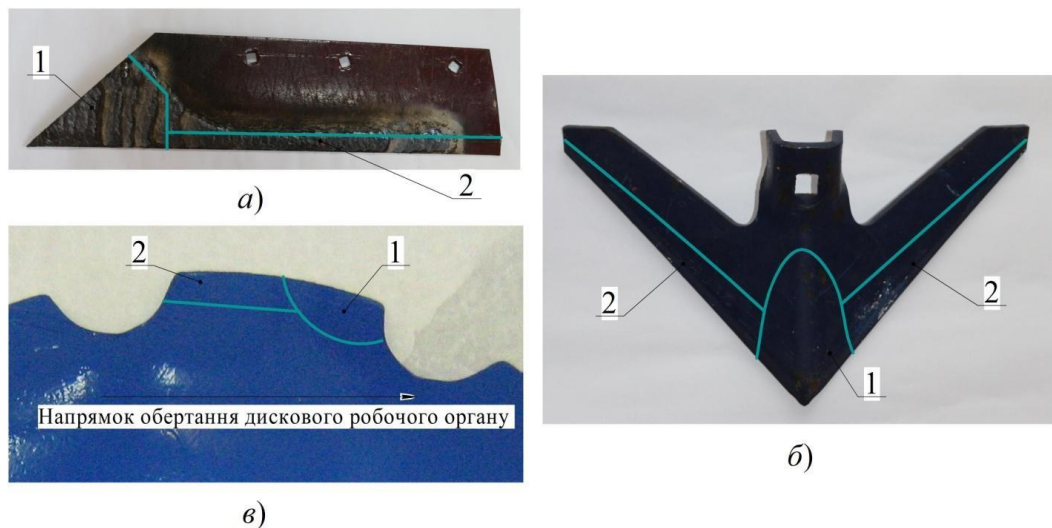


Рис. 2.9. Схеми нанесення зносостійкого покриття на різальні елементи робочих органів ґрунтообробних машин для забезпечення ефекту самозагострювання та рівномірності зношування:

- леміш (а),
 - стрілчата лапа (б),
 - дисковий робочий орган (в);
- 1, 2 – зони нанесення зносостійкого шару.

Значення χ встановлено для різних типів ґрунтів з урахуванням їхнього стану.

Таблиця 2.3 Співвідношення між параметрами зносостійкого шару χ

Ґрунт	Стан ґрунту	Критерій χ		
		Леміш	Стрілчата лапа культиватора	Дисковий робочий орган
Супіщаний	Поле після збирання с/г культур	1,50...1,60	1,20...1,30	1,10...1,15
	Пухкий ґрунт	-	1,05...1,15	1,05...1,10
Середній суглинок	Поле після збирання с/г культур	2,25...2,35	2,45...2,55	1,90...2,00
	Пухкий ґрунт	-	1,80...1,90	1,50...1,60
Глина легка	Поле після збирання с/г культур	2,35...2,45	2,40...2,50	2,10...2,15
	Пухкий ґрунт	-	1,80...1,90	1,55...1,65

Швидкість руху ґрунтообробного агрегату істотно впливає на характер зношування робочих органів ґрунтообробних машин і, відповідно, на співвідношення параметрів зносостійкого шару в різних зонах робочих органів. Дослідження критерію χ проводили на агрегатах, які працювали у діапазоні швидкостей 10...11 км/год. У разі подальшого збільшення швидкості необхідно вводити коригувальний коефіцієнт Ω , який визначається за формулою:

$$\Omega = (V_{роб} - V_{поч}) \times \beta \quad (2.6)$$

де $V_{роб}$ – робоча швидкість агрегату; $V_{поч}$ – початкова швидкість агрегату (11 км/год); β – поправочний коефіцієнт, який ураховує зростання інтенсивності зношування зони 1 під час зростання швидкості руху агрегату (для супіщаних і піщаних ґрунтів $\beta \approx 1,03$, для суглинків $\beta \approx 1,025$ та для глиняних ґрунтів $\beta \approx 1,012$).

Початковий кут загострення робочих органів ґрунтообробних машин значно впливає не лише на реалізацію ефекту самозагострювання, а й на їх довговічність. Аналіз дослідних робіт у поєднанні з даними експлуатаційних досліджень дозволив визначити оптимальні кути загострення для різних типів робочих органів:

- для лемішів: лезова частина – $8...10^\circ$, носова частина – $20...27^\circ$;
- для стрілочатих лап: лезова частина – $8...10^\circ$, носова частина – $25...30^\circ$;
- для дискового робочого органу – $28...34^\circ$.

При зміцненні стрілочатих лап зовнішнім зносостійким шаром загострення крил лап проводили з внутрішнього боку, причому загострювання виконувалося односторонньо у всіх випадках.

У літературі зустрічаються суперечливі дані щодо сторони нанесення зносостійкого матеріалу на стрілочату лапу (зовнішню чи внутрішню), тому для експериментальних досліджень виготовляли лапи з обома варіантами нанесення.

Експлуатаційні дослідження показали, що у всіх робочих органів, виготовлених відповідно до рекомендацій теоретичних досліджень, спостерігався ефект самозагострювання.

При використанні стрілочатих лап із внутрішнім зносостійким шаром на супіщаних та суглинкових ґрунтах виявлялися виступи зміцненого шару, які обломлювалися при контакті з твердими включеннями ґрунту. Довговічність таких лап на цих ґрунтах була в $1,6...1,9$ раза меншою, ніж у серійних. На глинистих ґрунтах лапи з внутрішнім зносостійким шаром демонстрували

ефект самозагострювання, а їх довговічність перевищувала лапи із зовнішнім шаром на 2,8%.

Процес самоорганізації (самозагострювання) робочих органів, досягнутий завдяки нанесенню зносостійкого шару, дозволив значно зменшити витрати пального при роботі на суглинкових і глинистих ґрунтах та підвищити довговічність на супіщаних і піщаних ґрунтах порівняно з серійними робочими органами.

Результати теоретичних і експлуатаційних досліджень дозволяють впроваджувати самозагострювальні різальні елементи робочих органів на аграрних підприємствах із урахуванням особливостей експлуатації та типів ґрунтів.

2.4 Вплив абразивного зношування на атмосферну корозію робочих органів ґрунтообробних машин

Підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин може здійснюватися за допомогою трьох груп методів: конструкційних, технологічних та експлуатаційних [4, 16]. До цього часу більшість досліджень зосереджено на конструкційних та технологічних методах, таких як створення нових триботехнічних матеріалів, нанесення зносостійких покриттів різними способами, оптимізація геометрії деталей, забезпечення самоорганізації вузлів тертя тощо.

Тертя поверхні робочих органів об ґрунт характеризується малими питомими тисками частинок ґрунту та сприятливою геометричною формою без різальних кромek. У таких умовах абразивні частинки спричиняють інтенсивну мікропластичну деформацію поверхневих шарів, що веде до утворення окиснювального зношування. Водночас його інтенсивність значно перевищує рівень звичайного окиснювального зношування, що спостерігається під час роботи звичайних трибоспряжень.

Протягом року робочі органи ґрунтообробних машин експлуатуються досить короткий час, тоді як неробочий період становить близько 90% (за

даними корпорації «Сварог Вест Груп»). У сільськогосподарському виробництві застосовують такі способи зберігання ґрунтообробних машин: на відкритих майданчиках (з асфальтовим, гравійним, бетонним, ґрунтовим або трав'яним покриттям); під навісом (з бетонним, асфальтованим або гравійним покриттям); у закритих приміщеннях (опалювальних та неопалювальних, з бетонним або асфальтовим покриттям). Останній варіант не набув широкого поширення через необхідність значних капіталовкладень.

Під час зберігання робочі органи піддаються атмосферній корозії, а після відновлення експлуатації інтенсивність їх зношування збільшується. Тому захист від корозії слід розглядати як важливий фактор підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин.

Дослідження проводилися у виробничих умовах Республіки Білорусь на спеціальних зразках. На рис. 2.10 представлені результати визначення корозійного руйнування незахищених сталевих зразків за різних способів зберігання протягом 20 місяців.

Як видно з рис. 2.10, величина корозійного руйнування суттєво залежить від умов зберігання. За 20 місяців втрати металу від корозії становили: у закритому приміщенні – 54...64 г/м²; на відкритому майданчику – 219...316 г/м²; на поверхні ґрунту – 280...360 г/м².

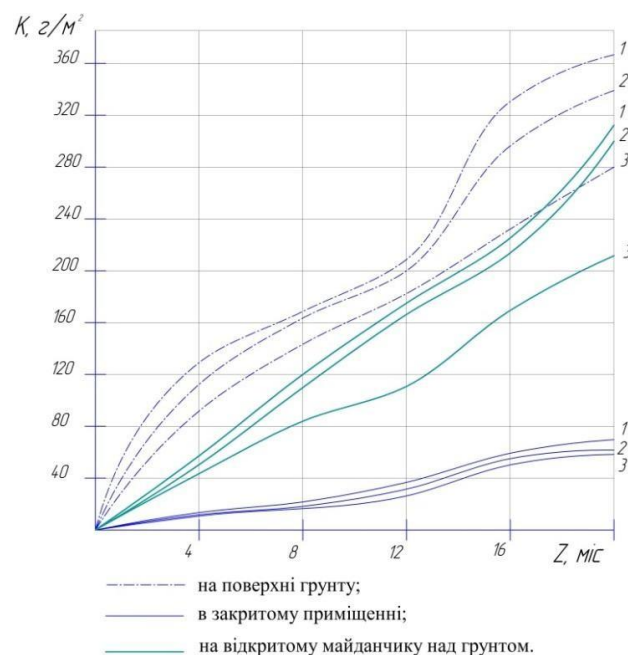


Рис. 2.10. Залежність корозійного руйнування сталей від тривалості та способів їх зберігання: 1 – сталь 3; 2 – сталь 45; 3 – сталь 65Г

Для вивчення впливу попередньої корозії на інтенсивність зношування використовували зразки зі сталі 65Г, сталі 45 та сталі 3 на лабораторній установці за методом «гільза». Абразивним середовищем служив кварцовий пісок, 99% частинок якого мали розмір 0,16...0,315 мм. Швидкість обертання шпинделя установки становила 240 об/хв, а питомий тиск зразка на абразив – 0,5 кГ/см². Тривалість експерименту – 20 місяців.

Зразки знімали для досліджень кожні 4 місяці та зберігали трьома способами: у закритому приміщенні, у відкритому приміщенні над ґрунтом та безпосередньо на поверхні ґрунту.

За результатами експерименту встановлено залежність інтенсивності абразивного зношування сталей від величини корозійного руйнування.

Коефіцієнти a , b і c для різних способів зберігання визначені експериментально.

Незважаючи на практичну цінність проведених досліджень, вони мають ряд обмежень:

- експерименти проводилися на сталях, які наразі не застосовуються для виготовлення робочих органів ґрунтообробних машин (крім сталі 65Г);
- дослідження виконувалися лише в одній кліматичній зоні;
- не враховувався вплив способу термічної обробки сталі на інтенсивність корозії;
- не розглядалася можливість нанесення захисних покриттів під час зберігання;
- установка за методом «гільза» не відтворює реальні умови зношування робочих органів;
- зразки не піддавалися абразивному зношуванню перед зберіганням, що не дозволяє оцінити процес атмосферної корозії робочих органів у реальних умовах.

Отримані результати дозволяють зробити такі висновки:

- способи зберігання ґрунтообробних машин розподіляються так: 71% – на відкритих майданчиках (переважно асфальтованих або бетонних), з них 12% з нанесеним захисним покриттям; 29% – під навісом на майданчиках

(асфальтованих або бетонних), з них 74% з нанесеним захисним покриттям. Як захисне покриття зазвичай (понад 95%) використовують відпрацьоване моторне мастило. Ці дані підкреслюють необхідність проведення досліджень впливу захисних покриттів на інтенсивність атмосферної корозії робочих органів;

- у перші дні зберігання на поверхні робочих органів явні ознаки атмосферної корозії відсутні (рис. 2.11);
- під час зберігання корозія розвивається інтенсивніше на поверхні, яка раніше піддавалася абразивному зношуванню (рис. 2.12).



Рис. 2.11. Секція борони БПД-4,2 після напрацювання 1282 га, термін зберігання після роботи 45 год



Рис. 2.12 Поверхня диска борони «Gregoire Besson» після напрацювання 3340 га, термін зберігання після роботи 27 днів

Це пояснюється особливостями механізму абразивного зношування: взаємодія абразивних частинок ґрунту з поверхнею сталі проявляється здебільшого у її пластичному деформуванні та формуванні вторинних структур, які піддаються зношуванню. У поверхневому шарі сталі при цьому утворюються дефекти кристалічної структури, що сприяють появі оксидних плівок на поверхні.

Отримані дані вказують на те, що існуючі залежності для визначення величини корозійного руйнування поверхні робочих органів ґрунтообробних машин за тривалістю та способом зберігання не можуть бути застосовані в реальних умовах, оскільки в них не враховано активаційний вплив попереднього абразивного зношування на процес атмосферної корозії.

Висновки по розділу 2

1. На основі інтеграції знань із різних наук створено фізико-математичну модель трибосистеми «робочий орган – ґрунт». Виявлено її специфічні особливості, визначено процеси, що відбуваються під час функціонування системи, встановлено енергетичний та масовий баланс і окреслено напрямки, який дозволяє суттєво підвищити довговічність і зносостійкість робочих органів ґрунтообробних машин.

2. Представлено результати теоретичних та лабораторних досліджень процесу самоорганізації ґрунтового середовища. Встановлено, що під час самоорганізації змінюються абразивні властивості ґрунту, переважно в бік їх збільшення. Зовнішні фактори по-різному впливають на інтенсивність процесу на різних типах ґрунтів. Урахування цих процесів у період експлуатації ґрунтообробних машин сприятиме суттєвому підвищенню їх довговічності та зносостійкості.

РОЗДІЛ 3

ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці – це сукупність законодавчих актів та відповідних їм соціально-економічних, технічних, гігієнічних і організаційних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки, збереження здоров'я та працездатності людини під час виконання трудових функцій [18].

До охорони праці безпосередньо належать також пожежна безпека та блискавкозахист, оскільки пожежі на виробництві та в побуті, а також грозові розряди загрожують не лише матеріальним цінностям, а й життю людей під час обробітку картоплі. У умовах спеціалізації та концентрації сільськогосподарського виробництва на основі міжгосподарської кооперації та агропромислової інтеграції зростає кількість техніки в сільській місцевості, що робить ще більш важливою належну підготовку сільських працівників у питаннях безпеки та виробничої санітарії.

3.1 Організація умов та заходів з охорони праці

Для створення на робочому місці у кожному структурному підрозділі безпечних умов праці відповідно до нормативно-правових актів та забезпечення дотримання прав працівників у сфері охорони праці роботодавець організовує функціонування Системи управління охороною праці (СУОП). Вона є складовою загальної системи управління організацією і спрямована на запобігання нещасним випадкам та професійним захворюванням, включаючи комплекс правових, організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних, соціально-економічних і лікувально-профілактичних заходів для збереження життя, здоров'я та працездатності найманих працівників.

СУОП підприємства охоплює суб'єкта та об'єкта управління, які тісно взаємопов'язані, а також заходи та засоби управління.

Основні принципи політики у сфері охорони праці включають:

- органічне поєднання охорони праці з усіма видами діяльності підприємства;
- визначення загальних завдань та обов'язків керівництва щодо постійного покращення стану охорони праці, підтримку формування громадських органів та інформування працівників про умови праці;
- формування політики на основі комплексної оцінки рівня небезпеки виробничих об'єктів;
- відповідність заходів характеру та масштабам ризиків;
- документальне оформлення, доведення до працівників і внесення коректив у разі змін виробничого процесу.

3.2 Аналіз умов та заходів з охорони праці під час роботи дисковими ґрунтообробними машинами

Вимоги безпеки при роботі з трактором та навісними машинами

Загальні правила:

- Не відпочивати в борозні або в кабіні трактора при працюючому двигуні.
- Місця відпочинку для групової роботи визначаються за межами поля.
- При недомаганні негайно припинити роботу, повідомити керівництво та звернутися до медпункту.

Вимоги безпеки до початку роботи:

1. Одягнути спецодяг, заправити його, щоб не було звисаючих кінців.
2. При під'єднанні трактора до причіпної машини відійти не менш як на 1,5 м від техніки; з'єднання проводити тільки при повній зупинці.
3. Перед запуском двигуна перевірити положення важелів передач і справність блокуючих пристроїв.
4. Починати роботу лише після повної перевірки агрегату.
5. При запуску пускачем не намотувати мотузку на руку.

6. Перед рухом переконатися, що ніхто не перебуває на шляху, подати сигнал попередження.

7. Особливо обережно поводитися при навішуванні навісних машин.

Вимоги безпеки під час роботи:

- Переконатися, що підйом, опускання навісного знаряддя та повороти не створюють небезпеки для оточення.
- Не сідати та не сходити з агрегату під час руху.
- Не перебувати під піднятим навісним знаряддям для регулювання або ремонту; не залишати його піднятим під час довгих зупинок.
- На причіпних знаряддях забороняється встановлювати додаткові сидіння, якщо це не передбачено заводом-виробником.
- Трактор у нічний час повинен мати справне освітлення.
- Очищати плуг від бур'янів та налиплого ґрунту тільки після повної зупинки агрегату.
- Борони та луцильники очищати гачками; зубці борін встановлювати скосами у напрямку руху при наявності рослинних залишків для самоочищення.
- При зберіганні зубові борони ставити зубцями вниз.
- Для дискових борін і луцильників перевіряти правильність встановлення чисток (зазор ≥ 2 мм).

Заходи безпеки в аварійних ситуаціях:

- При несправності агрегату негайно зупинити його.
- У разі нещасного випадку повідомити адміністрацію та надати першу долікарську допомогу.
- Місце події залишити без змін до завершення розслідування.

Вимоги безпеки після закінчення робіт:

1. Вигнати агрегат із загінки і поставити на стоянку за затвердженим маршрутом.
2. Заглушити двигун, загальмувати трактор; у холодний період злити воду з системи охолодження.
3. Очистити агрегат від бруду, пилу та рослинних залишків.

4. Оглянути та усунути виявлені недоліки.
5. Зняти спецодяг, вмитися або прийняти душ.

3.3 Висновки по розділу

1. Охорона праці є комплексною системою заходів правового, організаційного, технічного, санітарно-гігієнічного та соціально-економічного характеру, яка забезпечує збереження життя, здоров'я та працездатності працівників у процесі виконання робіт.

2. Забезпечення безпеки на робочому місці у структурних підрозділах досягається через функціонування системи управління охороною праці (СУОП), яка включає суб'єкта та об'єкта управління, а також комплекс заходів і засобів, спрямованих на запобігання нещасним випадкам та професійним захворюванням.

3. Основні принципи політики підприємства у сфері охорони праці передбачають органічне поєднання з усіма елементами діяльності, визначення завдань та зобов'язань керівництва щодо покращення умов праці, оцінку рівня небезпеки виробничих об'єктів, відповідність заходів характеру і масштабу ризиків, документальне оформлення та інформування працівників.

4. Встановлено основні вимоги безпеки під час роботи з трактором і навісними машинами: до початку роботи, під час роботи, у аварійних ситуаціях та після закінчення робіт. Дотримання цих правил забезпечує зменшення ризику травматизму, підвищує ефективність та довговічність техніки, а також сприяє збереженню здоров'я працівників.

5. Особлива увага приділяється запобіганню нещасним випадкам при обслуговуванні навісного обладнання, роботі в нічний час, очищенні робочих органів та зберіганні агрегатів, що є ключовим для безпечної експлуатації ґрунтообробних машин у сільськогосподарському виробництві.

6. Дотримання вимог охорони праці, впровадження СУОП та навчання персоналу сприяє формуванню безпечної виробничої культури та зменшенню ймовірності професійних захворювань і нещасних випадків.

РОЗДІЛ 4

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

4.1 Техніко-економічний аналіз комплексного підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин

Економічну оцінку проводили за кінцевим результатом, зокрема за збільшенням довговічності робочих органів ґрунтообробних машин протягом їх експлуатації. Робочі органи списували у разі втрати працездатності або невиконання агротехнічних вимог.

Зміцнення стрілчастих лап електродом Т-620 забезпечує збільшення їх довговічності в 1,53 рази, тоді як застосування комплексного підходу дозволяє підвищити довговічність у 1,84 рази, тобто на 31% додатково завдяки іншим заходам комплексного підходу. Аналогічне підвищення спостерігається й для інших типів робочих органів: для дискових робочих органів приріст становить 11%, для лемешів — 18% на супіщаних ґрунтах та 24% на суглинкових.

Економічну оцінку ефективності комплексного підходу проведено на дисковому універсальному агрегаті УДА-4,5 (див. табл. 4.1).

Економічний ефект впровадження запропонованого комплексного підходу для підвищення довговічності робочих органів інших ґрунтообробних машин становить 6–18 % від вартості нової машини протягом експлуатації одного комплексу робочих органів.

Економічна оцінка комплексного підходу підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин на прикладі УДА- 4,5

№	Показник	Агрегат	
		Серійний	Зміцнений + система підвищення довговічності
1	2	3	4
1.	Довговічність: одного дискового робочого органу, га агрегату, га	104 1248	205 2460
2.	Середні витрати пального за період експлуатації	7,3	6,8
3.	Початкова вартість робочого органу, грн	690	727, 24
4.	Економічний ефект унаслідок економії матеріалів, грн	-	14527,91
5.	Економія від зменшення витрат пального, грн	-	27675
6.	Економія від ліквідації операції загострювання під час експлуатації, грн	-	2760
7.	Економічний ефект унаслідок підвищення напрацювання, грн	-	9890
8.	Вартість додаткових засобів, матеріалів та заходів для впровадження запропонованого комплексного підходу підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів, грн	-	11876
9.	Загальний економічний ефект від упровадження запропонованого комплексного підходу підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів, грн	-	42976,91

Розрахунок економічного ефекту від застосування комплексного підходу є орієнтовним, оскільки не враховує впливу збереження працездатності машини на строки та якість виконання технологічних операцій. Для робочих органів, що визначають надійність ґрунтообробних машин, підтримання їх працездатного стану може істотно впливати на урожайність сільськогосподарських культур.

Висновки по розділу 4

□ Встановлено, що зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин відповідно до розроблених схем і критеріїв забезпечує ефективне самозагострювання протягом усього терміну експлуатації. Результати показали, що порівняно із серійними робочими органами кут загострювання різальних елементів зменшується для стрілчастих лап на 6–32%, для лемешів – на 8–19%, а для дискових робочих органів – до 13%. Процес самоорганізації зміцнених різальних елементів сприяє зниженню витрат дизельного пального: при роботі з дисковими ґрунтообробними агрегатами – приблизно на 10%, з плугами – на 14%, з культиваторами – на 11%.

□ Доведено, що застосування комплексного підходу до підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів дозволяє збільшити їхній ресурс у 1,84–2,51 раза та отримувати економічний ефект протягом усього терміну експлуатації в межах 13–18% від вартості нової машини.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що ґрунтообробні машини займають провідне місце в структурі машинно-тракторних парків аграрних підприємств, а їх надійність і якість виконання технологічних операцій визначаються довговічністю та зносостійкістю робочих органів. Аналіз робіт вітчизняних та зарубіжних дослідників показав, що підвищення довговічності робочих органів здебільшого базується на застосуванні зміцнювальних технологій, тоді як фундаментальне вирішення проблеми досягається комплексним підходом із використанням технологічних, конструктивних та експлуатаційних методів з урахуванням умов і режимів експлуатації.

Встановлено вплив типу ґрунту, його вологості та наявності біологічної фази на коефіцієнт внутрішнього тертя ґрунту та ступінь закріплення абразивних частинок. Зокрема, наявність біологічної фази підвищує питоме зчеплення в 1,14–2,72 рази, а збільшення вологості до перенасичення підвищує коефіцієнт внутрішнього тертя та закріплення абразивних частинок; після появи вільної води ці показники зменшуються.

Нанесення зносостійкого покриття дозволяє підвищити довговічність робочих органів: для дискових агрегатів – на 1,07–1,41 рази залежно від типу ґрунту, для стрічастих лап – на 1,39–1,53 рази, для лемешів – на 1,34–2,13 рази. Найбільш ефективним покриття є на ґрунтах із високою зношувальною здатністю (супіщані та піщані).

Розроблено принципи підвищення довговічності комплексним підходом із адаптацією зносостійкості до ґрунтово-кліматичних умов та режимів експлуатації. Це дозволяє підвищити довговічність робочих органів у 1,84–2,51 рази, а економічна оцінка свідчить про збереження 6–18 % вартості нової машини протягом експлуатації одного комплексу робочих органів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Tylczak J. H. Abrasive wear. ASM Handbook. *Materials Park, OH, ASM International*. 1992. № 18. P. 184–190.
2. Сало В. М., Лещенко С. М., Богатирьова Д. В. Сільськогосподарські машини вітчизняного виробництва для реалізації систем ґрунтозахисних та енергоощадних технологій. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2018. Вип. 47, Ч. 1. С. 3–10.
3. Державна фіскальна служба України [Електроний ресурс]. Режим доступу : <http://sfs.gov.ua/ms/f3> (дата звернення : 14.03.2020).
4. Сільське господарство України. Статистичний збірник. Київ: Державна служба статистики України, 2017. 245 с.
5. Офіційний сайт АТ «Ельворті» [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://elvorti.com/> (дата звернення: 14.03.2020).
6. Офіційний сайт ТОВ «Завод «Отікон» [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://ortikon.ua/> (дата звернення: 14.03.2020).
7. Офіційний сайт ВАТ «ЛКМЗ» [Електроний ресурс]. Режим доступу : <http://lkmz.com/> (дата звернення: 14.03.2020).
8. Офіційний сайт ВАТ «Велес-Агро ЛТД» [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://www.velesagro.com/> (дата звернення : 14.03.2020).
9. Офіційний сайт ТОВ НВП «БілоцерківМАЗ» [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://www.bcmaz.com.ua/> (дата звернення : 14.03.2020).
10. Офіційний сайт ВАТ “Галещина машзавод” [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://galmash.com.ua/ua> (дата звернення : 14.03.2020).
11. Офіційний сайт ВАТ “Уманьферммаш” [Електроний ресурс]. Режим доступу : <http://fermmash.com/corp/index.php/ru/> (дата звернення : 14.03.2020).
12. Офіційний сайт ВАТ “Хмільниксільмаш” [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://hmilniksil mash.business-guide.com.ua/> (дата звернення : 14.03.2020).

13. Офіційний сайт Корпорації “Агро-Союз” [Електроний ресурс]. Режим доступу : <http://www.agrosoyuz.com/ua/> (дата звернення : 14.03.2020).
14. Офіційний сайт ВАТ ВО “ВОСХОД” [Електроний ресурс]. Режим доступу: <http://voshod.ua/ukr/> (дата звернення: 14.03.2020).
15. Офіційний сайт ВАТ “Завод “Фрегат” [Електроний ресурс]. Режим доступу : <http://www.fregat.mk.ua/ua/index.php> (дата звернення : 14.03.2020).
16. Офіційний сайт ТОВ АК «Фаворит» [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://favorit-td.com.ua/> (дата звернення : 14.03.2020).
17. Пивовар В. Вітчизняна техніка для основного обробітку ґрунту. *Пропозиція*. 2010. [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://propozitsiya.com.ua/vitchiznyana-tehnika-dlya-osnovnogo-obrobitku-gruntu> (дата звернення : 14.03.2020).
18. Державна служба статистики [Електроний ресурс]. Режим доступу : <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення : 14.03.2020).
19. Офіційний сайт ДП «ЛЕМКЕН-Україна» [Електроний ресурс]. Режим доступу : <http://lemken.com.ua/> (дата звернення : 14.03.2020).
20. Офіційний сайт Weaving Machinery [Електроний ресурс]. Режим доступу : <http://www.weavingmachinery.net/> (дата звернення : 14.03.2020).
21. Офіційний сайт Great Plains [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://www.greatplainsint.com/uk> (дата звернення : 14.03.2020).
22. Офіційний сайт John Deere [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://www.deere.ua/uk/index.html> (дата звернення : 14.03.2020).
23. Офіційний сайт Case [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://www.caseih.com/emea/ua-ua/home> (дата звернення : 14.03.2020).
24. Офіційний сайт Amazone [Електроний ресурс]. Режим доступу : <http://www.amazone.net/default2009.asp> (дата звернення : 14.03.2020).
25. Офіційний сайт Vederstad [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://www.vaderstad.com/ua/> (дата звернення : 14.03.2020).
26. Офіційний сайт Kverneland [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://sng.kverneland.com/> (дата звернення : 14.03.2020).