

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

Допущено до захисту
“__” _____ 2023р.
Зав. кафедри к.т.н., доцент
(науковий ступінь, вчене звання)
А.В. Войтік
(підпис) (ініціали, прізвище)

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

тема роботи **«Комплексний підхід підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин»**

Виконав: студент 2 курсу, групи 21м-ім
освітньої програми магістр
спеціальності _____
208 «Агроінженерія»
Личак С.А.
(прізвище та ініціали)

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

м. Умань – 2023 рік

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ТА ЗНОСОСТІЙКОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ГРУНТООБРОБНИХ МАШИН.....	8
1.1. Забезпеченість ґрунтообробною технікою агропромислового комплексу та конструктивні особливості робочих органів ґрунтообробних машин	8
1.2. Аналіз зношування робочих органів ґрунтообробних машин та процесів, які протікають у зоні фрикційного контакту	12
1.3. Висновки до розділу	21
РОЗДІЛ 2 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ГРУНТООБРОБНИХ МАШИН КОМПЛЕКСНИМ ПІДХОДОМ АДАПТАЦІЇ ЇХ ЗНОСОСТІЙКОСТІ.....	22
2.1. Методологічні основи та програма досліджень.....	22
2.2. Фізико-математична модель системи «робочий орган – ґрунт»	24
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.....	51

РОЗДІЛ 4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ	52
4.1 Техніко-економічний аналіз комплексного підходу підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин	52
4.2 Висновки по розділу 4	54
ВИСНОВКИ	55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	57

Личак С.А. Комплексний підхід підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин (Кваліфікаційна робота, Уманський національний університет садівництва, 2023: пояснювальна записка на 55 сторінках, у т.ч. 4 розділів, 12 рисунки, 6 таблиць, 38 джерела літератури).

Кваліфікаційна робота вирішенню науково-прикладної проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин на основі комплексного підходу із застосуванням технологічних і конструктивних методів підвищення зносостійкості й довговічності з урахуванням умов експлуатації та впровадження науково обґрунтованої системи їх експлуатації. На сьогодні розв'язання проблеми довговічності та зносостійкості здебільшого досягається завдяки використанню відомих технологічних методів для певних ґрунтово кліматичних умов. Такий підхід не забезпечує підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин у разі зміни умов і режимів експлуатації.

Мета роботи підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин шляхом використання комплексного підходу адаптації їх зносостійкості до ґрунтово- кліматичних умов і режимів експлуатації.

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

Предмет дослідження – розроблення комплексного підходу підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин з урахуванням закономірностей впливу ґрунтово-кліматичних умов, конструктивних та технологічних параметрів, режимів експлуатації, а також умов зберігання.

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

Актуальність теми. У розвинутих країнах утрати, зумовлені тільки наслідками абразивного зношування, становлять від 1 до 4 % національного валового продукту [1]. В агропромисловому комплексі найбільше абразивному зношуванню піддаються робочі органи ґрунтообробних машин, які взаємодіють із середовищем ґрунту.

Ґрунтообробні машини займають одне з провідних місць у структурі машинно-тракторного парку сучасних аграрних підприємств. Утрата їх працездатного стану під час проведення польових робіт може суттєво вплинути на урожайність сільськогосподарських культур. У ґрунтообробних машинах елементом, який переважно лімітує довговічність машин, є робочий орган.

Відповідно пошук шляхів підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин має важливе значення для агропромислового комплексу України. Цю проблему необхідно вирішувати зусиллями конструкторів, технологів, дослідників і працівників аграрних підприємств.

Сьогодні підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин переважно зводиться до покращення зносостійких характеристик поверхні та геометричної форми робочих органів без урахування умов і режимів експлуатації.

Водночас залишаються без належної уваги експлуатаційні способи підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів, а саме: організація зберігання (80–90 % часу ґрунтообробні машини знаходяться на зберіганні, де піддаються корозії, яка суттєво інтенсифікує процес зношування поверхні); оптимізація режимів роботи машин (експлуатація при певній вологості ґрунту з певною швидкістю в період, коли ґрунт має найнижчу абразивну здатність, що забезпечить мінімальну швидкість зношування); своєчасна очистка від поживних решток (у соках рослин наявні амінокислоти, що здатні викликати

процеси на поверхні робочих органів, які інтенсифікують процес зношування); постійний нагляд за робочими органами та ін.

Вирішення проблеми підвищення довговічності й зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин на основі комплексного підходу із застосуванням технологічних і конструктивних методів підвищення зносостійкості та довговічності з урахуванням умов експлуатації та впровадження науково обґрунтованої системи їх експлуатації є, безумовно, актуальним завданням.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ТА ЗНОСОСТІЙКОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИН

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

На початку 2018 року в Україні налічувалося більше 300 тисяч ґрунтообробних машин (табл. 1.1). Протягом останніх років спостерігається збільшення кількості таких машин у сільськогосподарських виробників. Машинобудівна галузь України повною мірою спроможна забезпечити виробництво ґрунтообробних машин для агропромислового комплексу України [2]. За даними сайту державної фіскальної служби [3], за останні 3 роки спостерігається зменшення імпорту ґрунтообробної техніки та збільшення її експорту, основні країни експортери – Російська Федерація, Молдова, Німеччина, Казахстан (табл. 1.2).

Таблиця 1.1.

Наявність сільськогосподарської техніки в сільськогосподарських підприємствах на кінець 2017 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 такі компанії як: 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], ВАТ ВО

«ВОСХОД» [14], ВАТ «Завод «Фрегат» [15], ТОВ АК «Фаворит» [16], та інші [17].

Таблиця 1.2

Виробництво промислової продукції за видами за 2017 рік [18]

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

Незважаючи на такі позитивні статистичні дані, слід відмітити, що більшість підприємств закуповує закордоном робочі органи, які взаємодіють із середовищем ґрунту або матеріали для їх виготовлення (переважно борвмісну сталь). Деякі підприємства виготовляють робочі органи зі сталі вітчизняного виробництва. Найчастіше для цих потреб використовують сталь 65Г.

За даними сайту державної фіскальної служби [3], найбільші імпортери ґрунтообробної техніки: США, Німеччина, Швеція, Франція. Світовими лідерами з виробництва ґрунтообробних машин і робочих органів для них є: Lemken [19], Weaving Machinery [20], Great Plains [21], John Deere [22], Case [23], Amazone [24], Vederstad [25], Kverneland [26], Kuhn [27], Kleine [28], Bellota [29] та інші.

Існує велике різноманіття типів і видів робочих органів ґрунтообробних машин, які класифікують за багатьма ознаками (геометричною формою, глибиною обробітку, впливом на ґрунт, наявністю або відсутністю приводу тощо [30–41]. При вивченні процесу зношування робочих органів ґрунтообробних машин і пошуку шляхів підвищення їх довговічності та зносостійкості доцільно поділити на такі типи: лемішно-лапові та дискові. Варто зауважити, що процес зношування активних робочих органів істотно відрізняється від зношування неактивних робочих органів, тому пошукові шляхи підвищення довговічності та зносостійкості активних робочих органів

необхідно присвятити окреме дослідження. У пропонованій праці основну увагу зосереджено на трьох робочих органах ґрунтообробних машин (два з них належать до лемішно-лапових і один до дискових): леміш, стрілчаста лапа та вирізний дисковий робочий орган (рис. 1.1).

Співвідношення між геометричними параметрами робочих органів визначають їх тип і сферу застосування. До основних геометричних параметрів лемішно-лапових робочих органів, які не представлено на рис. 1.1, слід також зарахувати товщину та кут загострення (рис. 1.2).

Під час виконання технологічної операції обробітку ґрунту внаслідок абразивного зношування робочі органи змінюють свої геометричні параметри (рис. 1.3), що призводить до погіршення якості виконання технологічної операції та зростання тягового опору агрегату.

У процесі зношування, окрім геометричних параметрів, змінюються й фізико-механічні властивості матеріалу робочих органів ґрунтообробних машин.

За останні 50–60 років навантаження на робочі органи ґрунтообробних і посівних машин збільшилося приблизно в 4 рази (у зв'язку із збільшенням швидкості їх роботи та ущільненням ґрунту важкою сільськогосподарською технікою) [42, 43]. Усе це призводить до постійного зростання інтенсивності зношування робочих органів і зменшення їх надійності, саме тому гостро постає питання вирішення науково-практичної проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин.

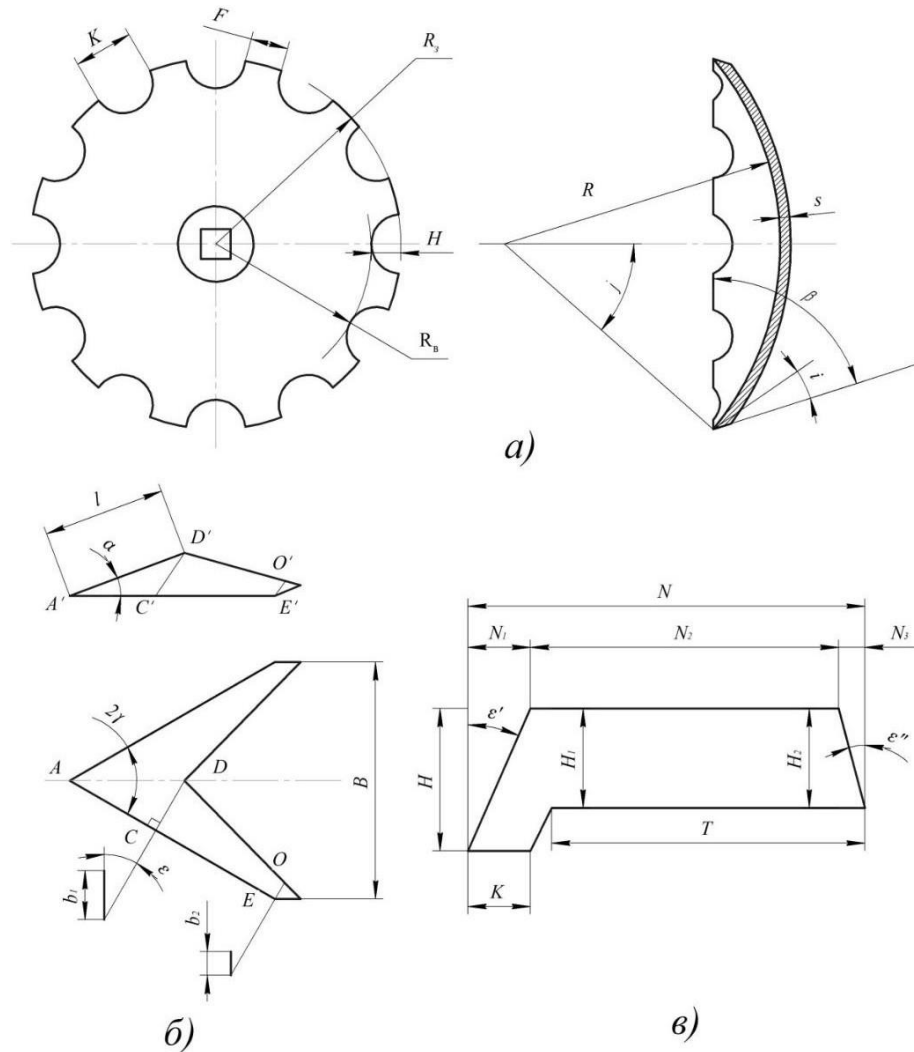


Рис. 1.1. Загальний вигляд та основні геометричні параметри робочих органів ґрунтообробних машин [30–41, 44], які використовували під час досліджень: а) – дисковий вирізний робочий орган; б) – стрілочаста лапа; в) – леміш; R_z – зовнішній діаметр диска; R_b – внутрішній діаметр диска; K – ширина впадини; 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

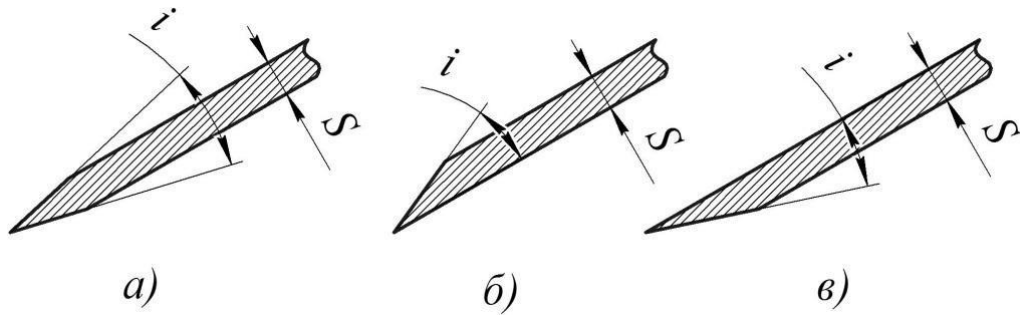


Рис. 1.2. Схема способів загострення: а), б), в) – відповідно двостороннє, верхнє та нижнє загострення; S – товщина робочих органів

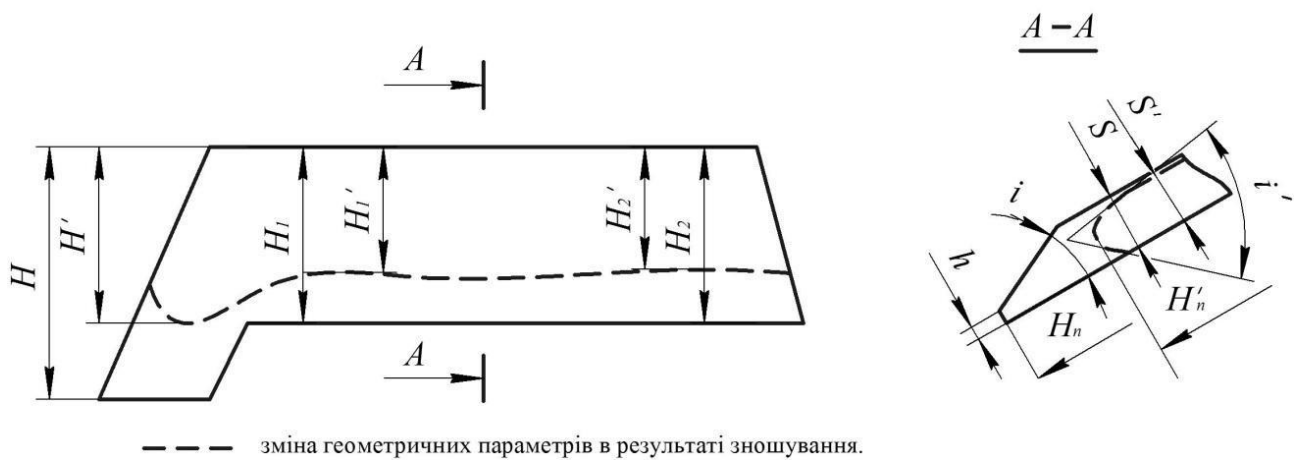


Рис. 1.3. Зміна форми лемеша в процесі виконання технологічної операції обробітку ґрунту: H , H_1 , H_2 , S , i , h – геометричні параметри нового лемеша, H' , H'_1 , H'_2 , S' , i' – геометричні параметри зношеного лемеша

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

Підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин можливе тільки за умови всебічного розуміння процесу їхнього зношування. Під час експлуатації ґрунтообробних машин робочі органи піддаються інтенсивному зношуванню в агресивній абразивній масі (ґрунті), унаслідок чого в зоні контакту одночасно протікають механічні, фізичні та хімічні процеси. Співвідношення між інтенсивністю протікання цих процесів визначають механізм і характер абразивного зношування.

Зрозуміти механізми зношування будь-якого елемента трибосистеми неможливо без розуміння механізмів тертя. Перші спроби пояснення механізмів тертя зробив Леонардо да Вінчі [45] у подальшому процеси, що відбуваються під час тертя, вивчали Г. Амонтон, Дж. Т. Дезагюльє, 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 ін. На сьогодні домінантною в усьому світі стала «адгезійно-деформаційна» або «молекулярно-механічна» теорія, Базована на працях Ф. Боудена, Д. Тейбора, І.В. Крагельського та ін. На думку автора [46] дана теорія розглядає тільки макроскопічні аспекти механізмів тертя і не спроможна відповісти на фундаментальні питання трибології. Основним її недоліком є неврахування атомних зв'язків як в елементі трибосистеми так і взаємодія атомів різних елементів трибосистеми. В умовах абразивного зношування переважною складовою механізмів тертя і зношування буде саме механічна та молекулярна складова, тому взаємодією між атомами можна знехтувати.

У сучасному розумінні абразивне зношування (abrasive wear) – це механічне зношування внаслідок різальної або дряпальної дії твердих тіл або частинок, які знаходяться в закріпленому або вільному стані [47]. У сільськогосподарській техніці абразивному зношуванню найбільше піддаються робочі органи посівних і ґрунтообробних машин. Тому забезпечення зносостійкості зазначених деталей на стадії проектування – актуальне завдання сільськогосподарського машинобудування, вирішення якої можливе лише на основі адекватних уявлень про механізм абразивного зношування.

Механізм зношування напівзакріпленим абразивом відбувається переважно завдяки пластичному відтискуванню і меншою мірою шляхом мікрорізання [53]. Підтвердженням можливості одночасного протікання двох видів абразивного зношування є наявність на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин слідів мікрорізання та полірованої поверхні (рис. 1.4).

В праці К. Хокірігави та К. Като зазначається, що існують три різні режими абразивного зношування (рис. 1.5) [55].



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

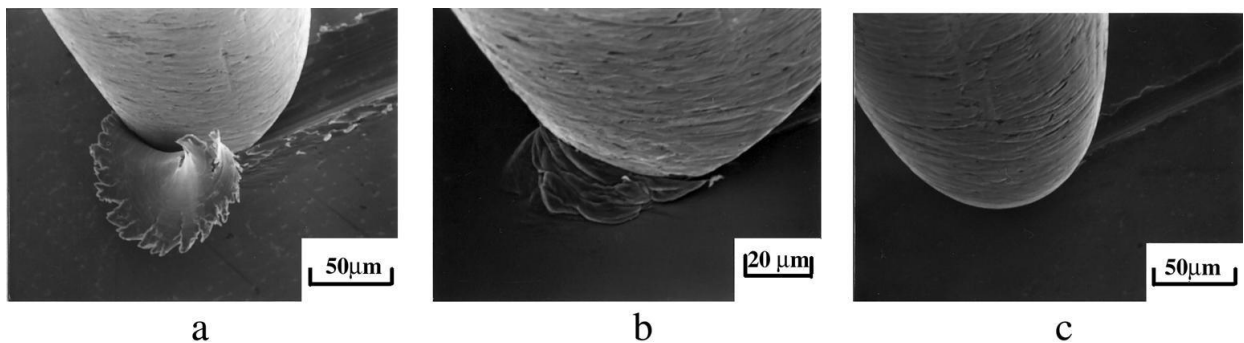


Рис. 1.5. Три різні режими абразивного зносу, що спостерігаються за допомогою SEM: режим різання (а), сталевий штифт на латунній пластині; клиноутворювальний режим (б), сталевий штифт на пластині з нержавійної сталі; режим оранки (с), сталевий штифт на латунній пластині [62].

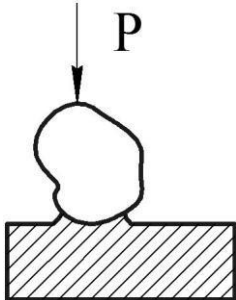
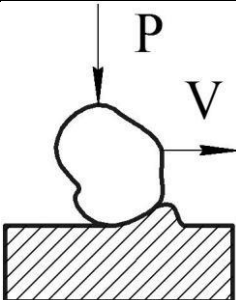
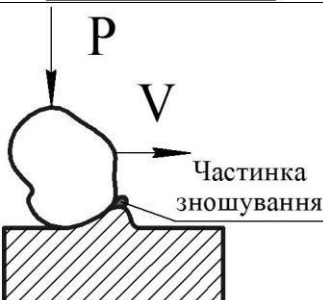
Режими зношування, представлені на рис. 1.5, належать до зношування закріпленими абразивними частинками й не можуть повною мірою описати складні механізми абразивного зношування, що відбуваються під час зношування сталюї поверхні в ґрунті. Абразивна частинка в ґрунті, яка взаємодіє з поверхнею робочого органу, може бути закріплена з одного, двох або трьох боків, тобто мати різні ступені свободи, що істотно впливає на механізми, які протікають на поверхні тертя.

Характеристика зв'язаного стану частинок – це як відомо ступінь закріпленості абразиву, що в низці випадків є провідним фактором зношування [56]. Наприклад, у важких дискових боронах передній ряд дисків зношується в 1,5...2 рази швидше, ніж задній, що, найімовірніше, пов'язане зі зменшенням ступеня закріпленості абразивних частинок у ґрунті, який обробляється заднім рядом дисків, оскільки інші фактори зношування для обох рядів дисків однакові [50]. Для визначення ступеня закріпленості абразиву необхідна відповідна шкала, яка на сьогодні не розроблена.

Відповідно до «молекулярно-механічної» теорії механізм абразивного зношування складається з 3 етапів [57, 58], представлених у табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Принципова схема руйнування матеріалів у процесі абразивного зношування [58]

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.

Викликає сумнів окреме протікання першого та другого етапів руйнування матеріалів у процесі абразивного зношування робочих органів у ґрунті. Більш імовірним під час зношування робочих органів, які працюють у ґрунті, є одночасне протікання першого та другого етапів, де процес проникнення і переміщення відбувається одночасно, про що може свідчити зміна ширини й глибини одиничної канавки на поверхні робочих органів.

У процесі абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин перед виникненням першого етапу можливе протікання й інших етапів, які можуть як зміцнювати робочу поверхню (наклеп частинками, що не проникають у поверхню через різні фактори), так і знижувати абразивну зносостійкість (взаємодія з патокою коріння, яка містить гліцин та аспірин, які сприяють окислювальному розчиненню сталі [59, 60]). Тому цю схему руйнування матеріалів під час процесу абразивного зношування робочих органів у ґрунті (табл. 1.3) можна зарахувати тільки до одного окремого випадку.

Механізм зношування робочих органів ґрунтообробних машин прямо залежить від розміру абразивних частинок у ґрунті та ступеня їхнього закріплення, на що яскраво вказує зміна шорсткості поверхні лемеша плуга в процесі експлуатації на ґрунтах із різним середнім розміром абразивних частинок. Зокрема, під час експлуатації лемешів на ґрунтах які містять більше дрібних абразивних частинок, показники шорсткості становили $R_a=0,8$ мкм, $R_t=6,86$ мкм, $R_v=4,78$ мкм, $R_p=2,32$ мкм, а при збільшенні відсотка крупних фракцій абразивних частинок $R_a=1,13$ мкм, $R_t=10,50$ мкм, $R_v=7,60$ мкм і $R_p=2,74$ мкм [61].

Під час експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин у ґрунті шорсткість металевої поверхні змінюється й прагне до певного стабільного значення. Інколи поверхня робочого органу буде вигладжуватися, а інколи вихідна гладка поверхня ставатиме шорсткою, що зі свого боку буде залежати від переважальних механізмів зношування (полідеформаційного руйнування чи зняття мікростружки). У процесі експлуатації робочих органів у ґрунті

зношування їхньої поверхні відбувається за наявності двох механізмів зношування поверхні, наведених вище. Переважання одного з двох механізмів зношування залежить від характеристик абразивної маси (розмір абразивних частинок, коефіцієнт форми абразивних частинок, ступінь закріплення абразивних частинок, вологість тощо), з якою взаємодіє кристалічне тіло, від умов експлуатації (швидкість відносного переміщення та тиск на поверхні тертя) та фізико-механічних властивостей кристалічного тіла. Абразивна маса так само змінює геометричні параметри абразивних частинок, зокрема після циклічної взаємодії абразивних частинок із поверхнею кристалічного тіла частинки округлюються, що призводить до зменшення коефіцієнта форми абразивних частинок.

Кількість вакансій (точкових дефектів) під час тертя в тонкому приповерхневому шарі (кристалічного тіла) доходить до $2,5 \times 10^{21}$ атомів/см³. У звичайних умовах не більше 10^{18} - 10^{19} атомів/см³ [62]. Вплив наявності вакансій на процес зношування залишається не вивченим до цього часу, адже більшість дослідників приділяють увагу аналізу впливу лінійних та об'ємних дефектів на процеси тертя і зношування. Виникнення лінійних дефектів (дислокацій) суттєво впливає на механізм зношування. У процесі тертя в поверхневому шарі наявність дислокацій невелика, основне їх скупчення відбувається на певній глибині від поверхні. Велике їх скупчення призводить до утворення тріщин, які розміщені паралельно до поверхні зношування. Коли тріщини досягають критичного значення, відбувається відокремлення продуктів зношування [62].

Експериментальні дослідження Б. І. Костецького засвідчили, що в зоні тертя металевих сплавів утворюються структури, відмінні від структури основного елемента трибосистеми як за фізико-механічними властивостями, так і за хімічним складом [63]. Такі поверхневі шари зі зміненою структурою елементів трибосистеми прийнято називати вторинними структурами (дисипативними структурами, які формуються під час тертя). Поверхневий шар, який бере участь у терті, на думку Л. М. Рибаківа – це новий стан речовини, віддалений від рівноваги і нестійкий, що породжено потоком вільної

енергії і призводить до нових типів організації матерії за точкою нестійкості; він виникає внаслідок обміну енергією і речовиною з навколишнім середовищем [64].

Під час тертя внаслідок зовнішніх дій на поверхні металу виникають певні зміни в кристалічній решітці, що зрештою призводить до зміни властивостей поверхневого шару. Унаслідок таких змін виникають усім відомі дефекти кристалічної решітки (точкові, лінійні, групи лінійних дефектів, їхні кластери), які спричиняють прискорення процесів дифузії.

Першим хто математично описав процес дифузії був відомий німецький вчений А. Фік [66], виходячи з гіпотези, що в ізотропному середовищі кількість дифузійної речовини Q , що переходить за одиницю часу через одиницю площі поперечного перерізу, пропорційна градієнту концентрації, який вимірюється 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.

Описуючи дифузію в багатокомпонентних металевих системах, доцільно використовувати узагальнений закон Фіка: дифузійний потік кожного компонента – це лінійна функція всіх концентрованих градієнтів, тобто [66]:

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

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

Дифузійні процеси в стаціонарних системах добре вивчені, чого не можна сказати про дифузійні процеси в динамічних системах тертя, дослідження яких пов'язані зі значними експериментальними й теоретичними складнощами. Такі труднощі зумовлені тим, що структура металевих систем формується внаслідок складної сукупності процесів, які відбуваються під час тертя і викликані високим рівнем напружень, впливу навколишнього середовища, значними об'ємними та поверхневими температурами й температурними градієнтами.

Здебільше процеси поверхневої дифузії в металевих сплавах експериментально досліджені під час тертя двох металевих сплавів з мастильним матеріалом та без нього (особливу увагу дослідники приділяли дифузії в мідних сплавах і сплавах Fe-Fe₃C). Процес дифузії в металевих сплавах, які працюють в абразивній масі (один з елементів трибосистеми – абразивна маса) узагалі залишається не вивченим. Установлення закономірностей цього процесу ускладнюється гетерогенною структурою ґрунту, відмінним хімічним складом різних типів ґрунтів та динамічністю процесу дифузії на поверхні металевого сплаву. Дифузію в поверхневі шари металевого сплаву речовин з ґрунту в процесі тертя досить складно дослідити, оскільки після утворення локальний дифузійний шар швидко видаляється з поверхні тертя внаслідок механічної складової процесу абразивного зношування. Видалення шару, що утворився в процесі дифузії, пов'язане із зменшенням зносостійкості утворених вторинних структур порівняно із зносостійкістю основного металевого сплаву [67].

Коефіцієнт тертя важлива характеристика фрикційного контакту двох тіл. В класичних та більшості сучасних роботах [69–75] коефіцієнт тертя між ґрунтом і поверхнею робочих органів розглядають тільки з механічної точки зору. Такий однобічний підхід не дозволяє об'єктивно описувати процеси, що протікають на поверхні тертя. Урахування всіх факторів під час визначення

коефіцієнта тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин дасть змогу більш якісно проводити проектування сільськогосподарських машин.

Розглядаючи фрикційну взаємодію двох тіл, необхідно спочатку розглянути фрикційні властивості елементів трибосистеми. У нашому випадку це ґрунт і поверхня робочого органу ґрунтообробних машин. Особливістю цієї трибосистеми є те, що для робочого органу ми розглядаємо тільки поверхню, а для ґрунту – весь об'єм, оскільки в процесі функціонування системи «робочий орган – ґрунт» відбувається постійне перемішування ґрунту і взаємодіяти з поверхнею робочого органу можуть об'єми ґрунту, які на початку функціонування трибосистеми знаходилися на певній відстані від поверхні робочого органу.

Фрикційні властивості ґрунту виявляються в дії сили опору ковзанню тіла (робочого органу, опорної поверхні тощо) щодо поверхні ґрунту – сили зовнішнього тертя та в дії сили опору ковзанню однієї частини ґрунту щодо іншої – сили внутрішнього тертя. У класичних працях для визначення сили зовнішнього тертя ґрунту запропоновано використовувати формулу Амонтона-Кулона:

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

Як відомо, ця залежність не враховує молекулярної складової процесу тертя, яку обов'язково необхідно враховувати під час проектування робочих органів ґрунтообробних машин, оскільки молекулярна складова займає значне місце в процесі тертя ґрунтової маси й робочої поверхні ґрунтообробних машин [76–77]. Саме тому математичне моделювання процесів, що відбуваються у фрикційному контакті твердого тіла та ґрунту з урахуванням всіх явищ і процесів у зоні контакту, становить інтерес для сільськогосподарського машинобудування.

Протягом року робочі органи ґрунтообробних машин експлуатують доволі короткий термін, неробочий період становить близько 90% (за даними

корпорації «Сварог Вест Груп»). У сільськогосподарському виробництві використовуються такі способи зберігання ґрунтообробних машин: на відкритих майданчиках (з асфальтованим, гравійним, бетонним, ґрунтовим та трав'яним покриттям); під навісом (з бетонним, асфальтованим та гравійним покриттям); у закритих приміщеннях (опалювальні та неопалювальні з бетонним та асфальтованим покриттям). Останній спосіб не набув широкого розповсюдження, оскільки потребує додаткових капіталовкладень. У процесі зберігання робочі органи ґрунтообробних машин піддаються атмосферній корозії і після відновлення експлуатації таких органів інтенсивність їхнього зношування зростає. У зв'язку з цим захист від корозії необхідно розглядати як важливий фактор підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин.

Висновки

1. Ґрунтообробні машини займають провідне місце в структурі машино-тракторних парків сучасних сільськогосподарських підприємств. Надійність ґрунтообробних машин і якість виконання обробітку ґрунту безпосередньо залежать від довговічності та зносостійкості робочих органів.

2. При проектуванні та виробництві серійних робочих органів ґрунтообробних машин не враховуються ґрунтово-кліматичні умови, у яких вони будуть експлуатуватися, що призводить до нераціонального використання потенційного ресурсу матеріалу робочого органу та зростання затрат на експлуатацію.

3. До нинішнього часу не встановлено впливу ґрунтово-кліматичних умов, режимів експлуатації та умов зберігання на довговічність та зносостійкість робочих органів ґрунтообробних машин.

4. Відсутні рекомендації сільськогосподарським підприємствам щодо раціональних режимів експлуатації та способів і методів зберігання ґрунтообробних машин, які дозволять підвищити довговічність і зносостійкість робочих органів.

РОЗДІЛ 2

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

2.6. Методологічні основи та програма досліджень

На цьому етапі розвитку ґрунтообробної техніки накопичений великий обсяг наукових і практичних знань у галузі підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів. Здебільшого розробка робочих органів із підвищеними показниками надійності базуються на технологічних та конструктивних методах для певного типу робочих органів, які спрямовані на вирішення проблеми для конкретних умов експлуатації. Виявлено, що такі методи не набули широкого застосування в практиці, оскільки не можуть бути використані на інших типах робочих органів і вразі зміни ґрунтово-кліматичних умов і режимів експлуатації.

Унаслідок загострення об'єктивного протиріччя між досягненням рівнем наукових знань з питань підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин і потребою виробництва виникає необхідність вирішення нових наукових і практичних завдань. Розв'язання цієї проблеми повинно ґрунтуватися на основі комплексного підходу із застосуванням технологічних і конструктивних методів з урахуванням умов експлуатації та впровадження науково обґрунтованої системи їх експлуатації. Процес розв'язання цієї проблеми відбувався поетапно відповідно до розробленої схеми, представленої на рис. 2.1.

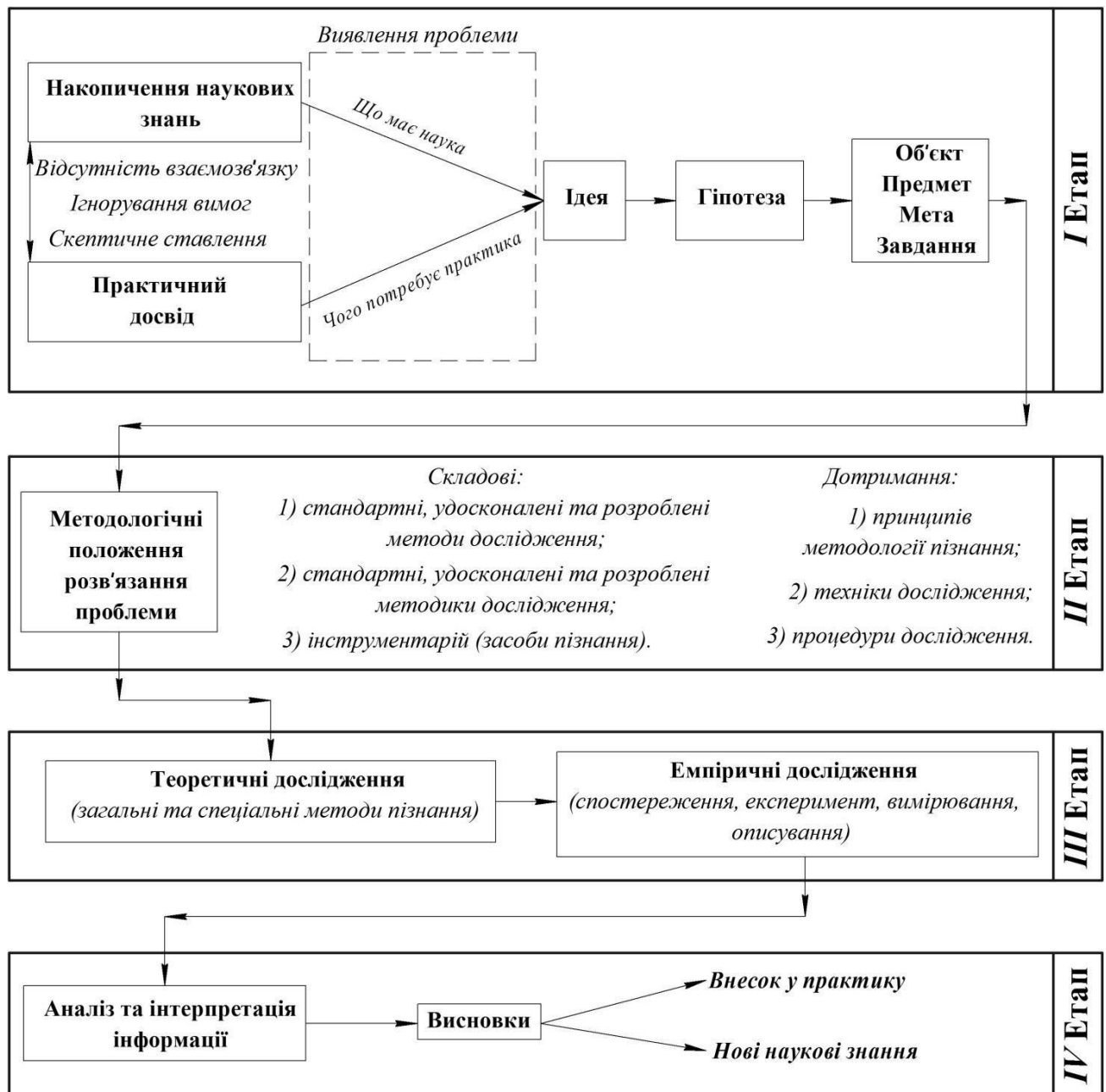


Рис. 2.1. Етапи розв'язання проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин

Відповідно до сформованих завдань дослідження (розділ 1) та розроблених етапів розв'язання проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин програма досліджень містить такі етапи:

- дослідити в лабораторних умовах: механічні, фізико-хімічні та триботехнічні властивості матеріалів робочих органів ґрунтообробних машин;

коефіцієнт тертя «рослинні рештки – поверхня робочого органу» і «грунт – поверхня робочого органу»; процес самоорганізації ґрунтового середовища;

- визначити в лабораторно-польових умовах: вплив рослинних решток на зношувальну здатність ґрунтового середовища; коефіцієнт форми абразивних частинок ґрунту; ступінь закріплення абразивних частинок у ґрунті та його вплив на абразивну здатність ґрунту; вплив попередньої корозії на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин; вплив абразивного зношування на інтенсивність корозії робочих органів ґрунтообробних машин;

- в експлуатаційних умовах з'ясувати : вплив умов та режимів експлуатації на зносостійкість та довговічність робочих органів ґрунтообробних машин; умови самозагострювання та рівностійкості зношування робочих органів ґрунтообробних машин.

Основними методами обробки отриманих результатів досліджень були аналітичний, графічний та графоаналітичний. Планування досліджень та обробку отриманих результатів проводили відповідно до загальновідомих методик [249–259].

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

У трибологічній системі одночасно протікає велика кількість процесів і явищ. Зазвичай у прикладних дослідженнях процеси і явища, які відбуваються в трибосистемі, розглядають окремо, що не дозволяє повною мірою пояснити їхню природу.

Основні процеси і явища, що проходять у динамічному стані для трибосистеми «робочий орган – ґрунт» представлені в роботі [278]. Для об'єктивного підходу до таких процесів і явищ необхідно використовувати системний аналіз, який дозволить упорядкувати і спростити міркування [279].

У перше спроби системного аналізу в трибології були зроблені Х. Чихосом у праці «Tribology – a system approach to science and technology of friction, lubrication and wear» (на пострадянському просторі, у зв'язку з помилковим перекладом, вона відома як «Системный анализ в трибонике») [280].

Проведений раніше системний аналіз трибосистем не можливо повністю застосовувати для трибосистеми «робочий орган – ґрунт», оскільки, як зауважено в роботі [27], вона має специфічні особливості, що не дозволяють їй повністю підпадати під класифікацію запропоновану.

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

- побудувати фізико-математичну модель трибосистеми в динамічному і статичному стані, яка може об'єктивно описати всі явища, процеси та субпроцеси, що відбуваються в трибосистемі;
- скласти феноменологічну модель процесів, які відбуваються в трибологічній системі;
- проаналізувати індивідуальні властивості деталей та агрегатні властивості трибосистеми;
- математично описати функціональні перетворення вхідних величин X у вихідні Y ;
- визначити основні критерії ефективного функціонування трибосистеми «робочий орган – ґрунт», а також обмеження й умови функціонування.

Застосування системного підходу до вирішення задач при моделюванні трибосистеми «робочий орган – ґрунт» дозволить:

- провести синтез знань з різних наук (фізика, хімія, математика, трибологія теорії систем, теорії управління, матеріалознавство, ґрунтознавство та ін.);
- суттєво скоротити час на проведення громістких лабораторних, стендових й експлуатаційних досліджень для прийняття об'єктивних рішень щодо підвищення зносостійкості складових частин трибосистеми.

Відповідно до визначення, зміни структури трибомеханічної системи можуть містити [20]:

1. *Утворення або зникнення елементів системи.* Як відомо з праці [28], трибосистема «робочий орган – ґрунт» утворюється з трьох складових: навколишнє середовище, робочий орган та ґрунт. У процесі її функціонування можлива поява змащувального прошарку між робочим органом і ґрунтом у вигляді води. Такий стан системи спостерігається у випадку перезволоження ґрунту (для піщаних та супіщаних ґрунтів при досяганні вологості 20%, а для суглинків і глини – 30% [38]). Поява четвертого елемента під час функціонування системи здебільшого призводить до невиконання необхідних вимог щодо перетворення вхідних величин X у вихідні Y .

2. *Зміна взаємозв'язків елементів.* У трибосистемі «робочий орган – ґрунт» доволі часто спостерігається зміна механізму зношування з абразивного на ударно-абразивне, абразивно-окислювальне та ін. На поверхні робочих органів одночасно на різних ділянках поверхні можливий прояв різних механізмів зношування.

3. *Зміна властивостей елементів системи.* Функціональне існування трибосистеми «робочий орган – ґрунт» передбачає зміну властивостей одного з елементів, а саме ґрунту (твердості, ступеня закріплення абразивних частинок, зміни просторового положення компонентів та ін.). Зміна властивостей робочих органів є небажаними, але неминучим явищем. У процесі функціонування трибосистеми відбуваються зміни таких властивостей: геометрії і топографії поверхні робочих органів; хімічний склад поверхні робочих органів; міцнісні властивості робочих органів; маса робочих органів.

Для зменшення негативних явищ при функціонуванні трибосистеми «робочий орган – ґрунт», а саме зміни властивостей робочих органів, необхідно на основі системного аналізу розробити теоретичну модель її функціонування.

Суттєва характеристика будь-якої моделі – ступінь її подібності до об'єкту моделювання. За цією ознакою всі моделі можна розділити на ізоморфні та гомоморфні. Моделюючи складні трибосистеми, варто використовувати ізоморфні моделі, оскільки вони містять основні параметри об'єкта моделювання і за суттю здатні замінити його.

Метою фізико-математичного моделювання трибосистеми «робочий орган – ґрунт» є встановлення функціональної залежності 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, м³/м, г/м, мм/м; E – модуль пружності матеріалу робочих органів, Н/м²; f_t – коефіцієнта тертя; V – швидкість переміщення робочих органів відносно ґрунту, м/с; p – тиск на поверхні робочих органів, Н/м; H_m – мікротвердість поверхні робочих органів, Па; L – шлях тертя, м; G_z – 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_z – твердість ґрунту, кг/м²; A – середній розмір абразивних частинок, м; K_ϕ – коефіцієнт форми абразивних частинок.

Трибосистема «робочий орган – ґрунт» і модель, що їй відповідає, складаються з елементів, представлених на рис. 2.2 [2].

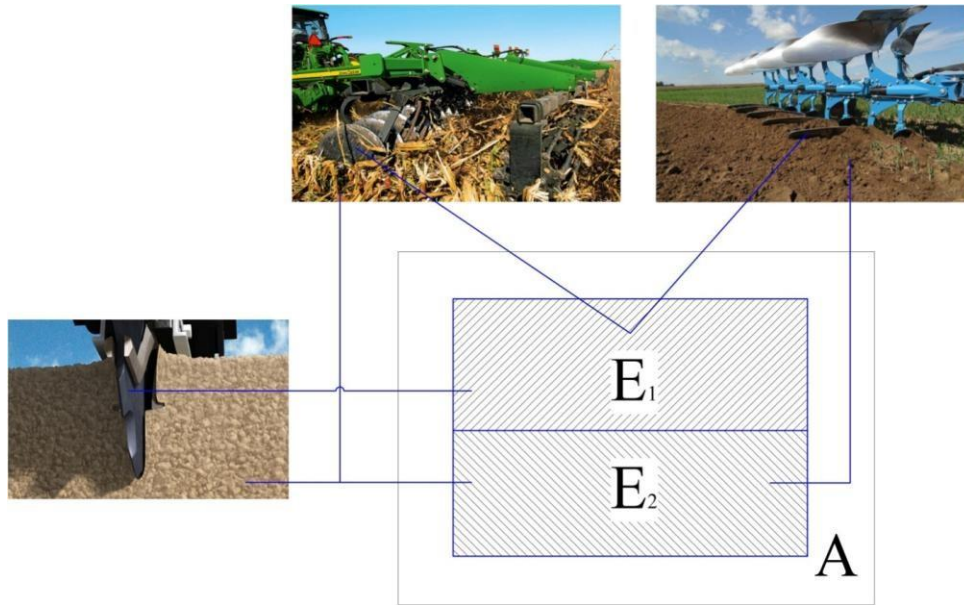


Рис. 2.2. Трибологічна система і трибологічна модель: A – довкілля; E_1 – робочий орган ґрунтообробних машин; E_2 – ґрунт

Відомо, що властивості елементів трибосистеми впливають на її структуру [26]. У такому разі, елементи трибосистеми суттєво відрізняються за своїми фізико-механічними та хімічними властивостями.

Особливості трибосистеми «робочий орган – ґрунт»:

- 1) інтенсивному зношуванню підлягає лише один з її елементів, а саме робочий орган;
- 2) джерелом проміжного середовища є другий елемент трибосистеми – ґрунт за певної вологості;
- 3) ґрунт як елемент трибосистеми неоднорідний за своїм складом і містить у собі ряд компонентів: фізичний пісок, фізичну глину, рослинну масу, живі організми, повітря, воду, солі, кислоти та ін. Кожний з цих компонентів чинить вплив на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин;
- 4) в окремих випадках цю трибосистему доцільно розділити на дві підсистеми, оскільки механізми зношування ділянок поверхні робочого органу відрізняються (залежно від ступеня закріплення абразиву в ґрунті).

Згідно із запропонованою моделлю, взаємодія елементів E_1 і E_2 трибосистеми відбувається за відсутності мастильного матеріалу. Хоча в глинистих і суглинистих ґрунтах після досягнення граничного вмісту вологості на робочій поверхні з'являється вільна вода, що виконує функції змазки [38]. Це піддержують результати експериментальних досліджень [3, 8], звідки видно, що коефіцієнт тертя суттєво зменшується в супіщаних ґрунтах за вологості 20%, у важких суглинках і глині – 30%. За такої вологості технологічний обробіток ґрунту стає неможливим. У зв'язку з цим ми не розглядали трибосистеми з мастильним матеріалом (водою).

Взаємодіючи, елементи трибосистеми впливають один на одного. Така взаємодія відбувається лише в динамічному стані трибосистеми «робочий орган – ґрунт», тоді як в статичному стані вона відсутня. Процеси, що протікають у динамічному стані трибосистеми, зображено на рис. 2.3.

До виходу трибосистеми належать такі супутні процеси (z), як наклеп поверхні тертя, старіння, термомеханічні, електричні процеси та ін.

Як видно, найбільшому впливові в трибосистемі піддається елемент 1 (робочий орган ґрунтообробної машини) з боку елемента 2 (ґрунту). Інтенсивність указаних процесів залежить від величини вхідних характеристик (V, P) та початкового стану елементів системи.

Мету існування трибосистеми «робочий орган – ґрунт» на фундаментальному рівні можна розглядати як трансформацію.

Головний вхід (X) у трибосистему – це відповідно рух та робота, яку виконує елемент E_1 , головний вихід – структура елемента E_2 . У реальних умовах отримуємо багато інших вихідних показників, що є побічними й переважно небажаними.

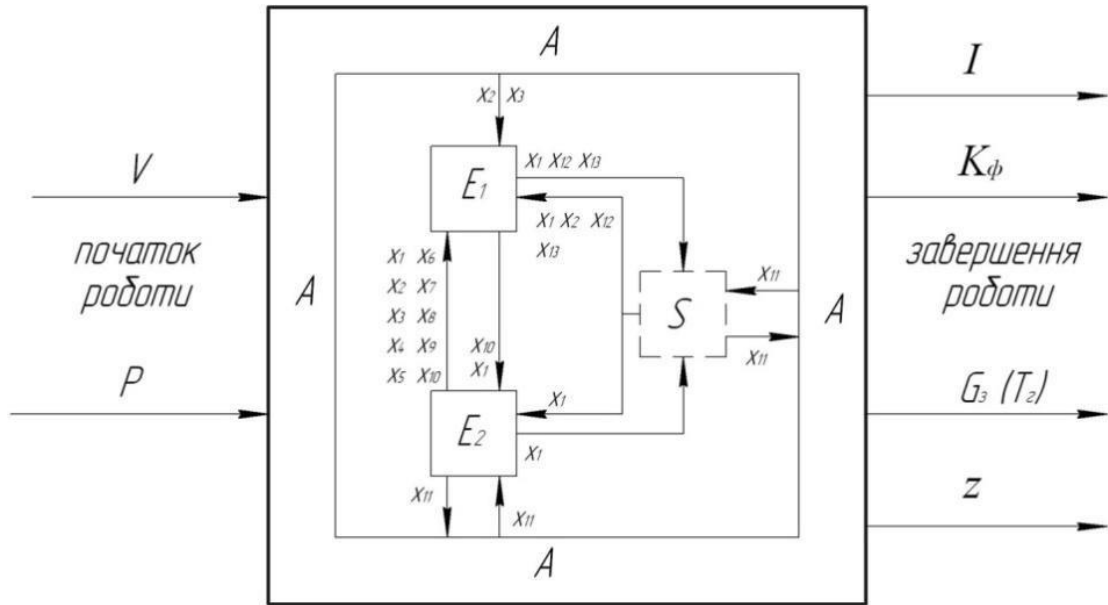


Рис. 2.3. Структурно-логічна схема системи «робочий орган – ґрунт» у динамічному стані: x_1 – адгезія; x_2 – корозія; x_3 – окиснення; x_4 – пружна деформація; x_5 – пластична деформація; x_6 – мікрорізання; x_7 – дряпання; x_8 – відривання; x_9 – руйнування поверхні тертя; x_{10} – фазові та структурні 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 виділяється під час взаємодії елемента E_1 з елементом E_2 , доволі швидко розсіюється в другому елементі, що пов'язано з відносно великим його об'ємом порівняно з першим елементом і суттєвою різницею температур із довкіллям.

Оскільки масовому зносу піддається лише один елемент трибосистеми, то масовий баланс можна виразити таким рівнянням:

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

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).

Здебільшого дослідники намагаються однобічно розв'язати проблему підвищення зносостійкості, покращуючи властивості робочої поверхні елемента E_1 . Насправді, для вирішення цієї проблеми доцільніше застосовувати системний аналіз трибосистеми «робочий орган – ґрунт».

Пріоритет застосування системного аналізу в трибології належить німецькому трибологу Х. Чихосу. Проведений раніше системний аналіз наявних трибосистем не можливо повною мірою застосувати для трибосистеми «робочий орган – ґрунт», оскільки вона має специфічні особливості, які не підпадають повною мірою під відому класифікацію [28].

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

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

Як видно з рис. 2.4, мету роботи реалізовано шляхом розв'язування таких завдань:

- пошуку вихідних даних для оптимізації процесу самоорганізації (самозагострювання) робочих органів;
- визначення цільових функцій.
- Під час аналізу вихідних даних і цільових функцій було сформовано критерії оптимізації. Після розробки локальних методів оптимізації критеріїв функції, розглядалася задача синтезу оптимального проекту самозагострювального різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин, що є кінцевим результатом теоретичних досліджень.

Етапи системного аналізу та оптимізацію вивчено детально, а синтез – з погляду загального підходу.

- Форма різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин повинна забезпечувати виконання відповідних технологічних операцій, здійснюючи при цьому якомога найменший опір.

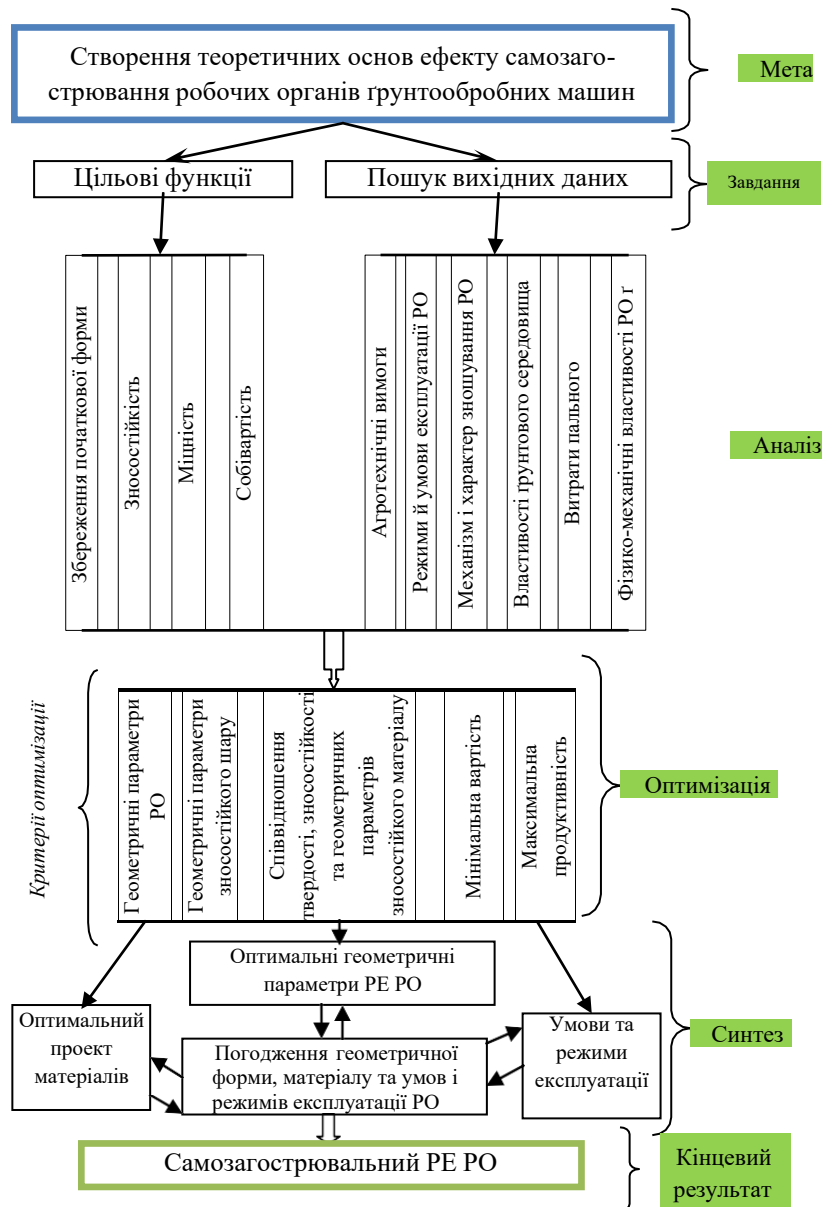


Рис. 2.4. Алгоритм розробки самозагострювальних різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин: РО – робочі органи; РЕ – різальний елемент [14]

Визначення форми твердого тіла, що здійснює опір потоку, є класичною задачею варіативного обчислення [25]. Вирішивши рівнянні Ейлера, визначимо 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.

Провівши розрахунки автор роботи [24] прийшов до висновку, що оптимальний кут різання α повинен бути в межах $39,3 \dots 52,7^\circ$. Це твердження добре узгоджується з дослідженнями А. Ш. Рабіновича, який встановив, що в результаті зношування різальних елементів кут утворений на лицевій поверхні леміша має нахил до горизонту $48 \dots 52,5^\circ$ [19].

Такі розрахунки базовані на врахуванні тільки одного коефіцієнта тертя – ковзання. Під час взаємодії робочого органу з ґрунтом на його поверхні відбуваються три види тертя: тертя ковзання, тертя кочення та тертя кочення з проковзування. Якщо великий ступінь закріплення абразивних частинок у ґрунті, то тертя ковзання переважає над усіма іншими видами тертя. Якщо ґрунт знаходиться в пухкому стані, перевага тертя ковзання не настільки суттєва і нехтувати іншими видами тертя недоцільно. Зазначмо, що проектуючи робочі органи ґрунтообробних машин, необхідно врахувати цю обставину.

Теоретично визначити оптимальних кут різання для різних станів ґрунту – складне завдання. Саме тому здійснено аналіз зношених робочих органів ґрунтообробних машин, які працювали на різних типах ґрунтів і в різних станах (табл. 2.1) і визначено кути, які утворені в різальній частині (рис. 2.5, 2.6 та 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, який утворився в результаті зношування (природній кут), відрізняється по всій довжині леза (рис. 2.5 та рис. 2.6). Це можна пояснити зміною величини тиску абразивної маси на різних частинах леза. Розробляючи самозагострювальні різальні елементи робочих органів, таку закономірність (рис. 2.7) необхідно врахувати під час обґрунтування співвідношення між параметрами зносостійкого шару й основного металу.



Рис. 2.5. Формоутворення різального елемента змінного долота леміша (експлуатація на супіщаних ґрунтах)



Рис. 2.6. Формоутворення різального елемента леза леміша(експлуатація 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 в процесі експлуатації на різних типах ґрунтів: точки *A, B, C, D* – місця проведення замірів

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

Для інших типів робочих органів ґрунтообробних машин спостерігається подібна закономірність зміни кута загострювання від типу ґрунту по довжині різальної кромки.

Досягнення форми природного зношування не завжди призводить до зменшення тягового опору агрегату, а відповідно й до зменшення витрат пального (рис. 2.8). Для об'єктивності оцінки впливу самоорганізації серійних робочих органів результати представлено у відсотковому значенні, оскільки обробіток ґрунту проводився різними агрегатами. За 100% узято витрати пального в процесі експлуатації агрегату з новими робочими органами.

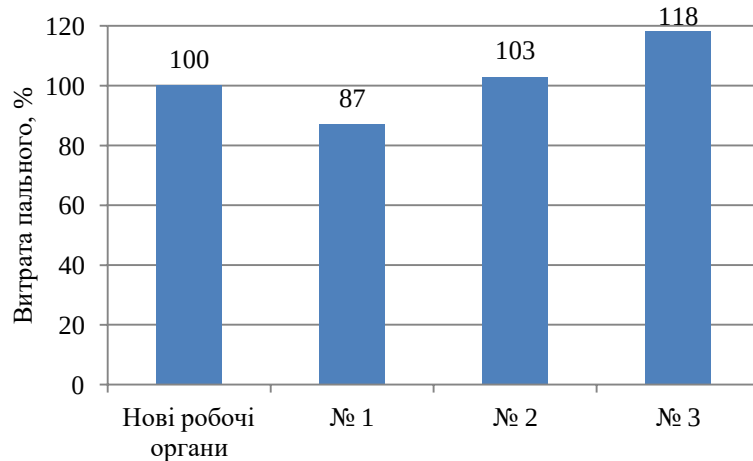


Рис. 2.8. Витрата пального в початковій формі і при досягненні форми природного зношування в процесі експлуатації для одношарових лемішів виготовлених зі сталі Hardox 500: № 1 – на супіщаних ґрунтах; № 2 – на суглинкових ґрунтах; № 3 – на легкій глині

Як видно з рис. 2.8, на піщаних і супіщаних ґрунтах зношування призводить до самоорганізації робочих органів, що сприяє процесові самозагострювання, який так само спричиняє зменшення витрат пального під час обробітку ґрунту. На суглинкових та глиняних ґрунтах природна форма зношування призводить до затуплення лезової частини й зростання витрат пального. Саме тому розробка самозагострювальних різальних елементів робочих органів для цих типів ґрунтів є найбільш актуальною. Для піщаних та супіщаних ґрунтів необхідно розробити заходи щодо підвищення зносостійкості зі збереженням природної форми зношування, а для суглинкових і глиняних ґрунтів – заходи, які дозволять керувати процесом зношування, з можливістю досягнення ефекту самозагострювання.

Під час проектування самозагострювальних різальних елементів робочих органів одним з основних показників є співвідношення зносостійкості матеріалів робочих органів та їхніх геометричних характеристик.

Для досягнення ефекту самозагострювання і забезпечення рівності зношування робочих органів співвідношення зносостійкості та товщини основного металу й зносостійкого шару повинно відповідати значенням, визначеним у відомих працях [5, 16, 17], відповідно до критерію. Зокрема вказано, що значення даного співвідношення повинно бути для більшості ґрунтів $\omega=1,5$ [. На основі аналізу зношених робочих органів, аналізу попередніх досліджень та практичного досвіду встановлено 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 у процесі експлуатації на пухких ґрунтах, оскільки вони не працюють у таких умовах.

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

Для дискових робочих органів критерій ω суттєво більший, що пов'язано насамперед із наявністю динамічних навантажень під час роботи на твердих ґрунтах. Цей результат підтверджено суттєвим зменшенням критерію ω унаслідок зменшення ступеня закріплення абразивних частинок у ґрунті, а отже, і його твердості.

За наявності кам'янистих складових у ґрунті критерій ω повинен бути суттєво збільшений, що б унеможливити обломлювання різальних елементів робочих органів.

У класичному розумінні співвідношення яке визначає критерій ω повинно відповідати залежності наведеній в роботі [17] по всій поверхні різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин. Дана залежність не розкриває повною мірою процеси самоорганізації робочих органів ґрунтообробних машин, оскільки не враховує особливості зношування складових частин робочих органів. Це співвідношення має забезпечувати не тільки можливість самозагострювання різальних елементів робочих органів, але й рівностійкість зношування робочих органів. В основі запропонованих співвідношень зносостійкості й товщини нанесеного зносостійкого та несучого шарів робочих органів лежать експериментальні дослідження характеру зношування робочих органів ґрунтообробних машин в залежності від абразивних властивостей ґрунту та режимів експлуатації.

Зони, на які запропоновано розділити робочі органи ґрунтообробних машин для забезпечення самоорганізації, що призведе до підвищення довговічності та забезпечить якісний обробіток ґрунту протягом усього терміну експлуатації представлені на рис. 2.9.

Рис. 2.9 зображує зони нанесення зносостійкого покриття на поверхню робочих органів ґрунтообробних машин для досягнення ефекту самозагострювання та рівностійкості: 1 – зона, яка найбільш інтенсивно зношується; 2 – зона з меншою інтенсивністю зношування. Такий розподіл не оптимальний, наприклад, леміш плуга більш доцільно поділити на 4 зони, але

це ускладнить, а в деяких випадках унеможливить процес нанесення зносостійкого шару в умовах ремонтних майстерень аграрних підприємств.

Зону 2 для лемішів і культиваторних лап можна зміцнювати точково для утворення зубчастої поверхні. Форма такої поверхні сприяє якісному виконанню технологічної операції і призводить до зменшення тягового опору на 3,2...6,4%, але зменшує зносостійкість на 8,1...14,5 %.

При використанні лемішів зі змінним долотом зона 1 не зміцнюється.

Для досягнення ефекту самозагострювання різальних елементів робочих органів та рівностійкості зношування необхідно, щоб параметри зносостійкого шару мали співвідношення:

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

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.

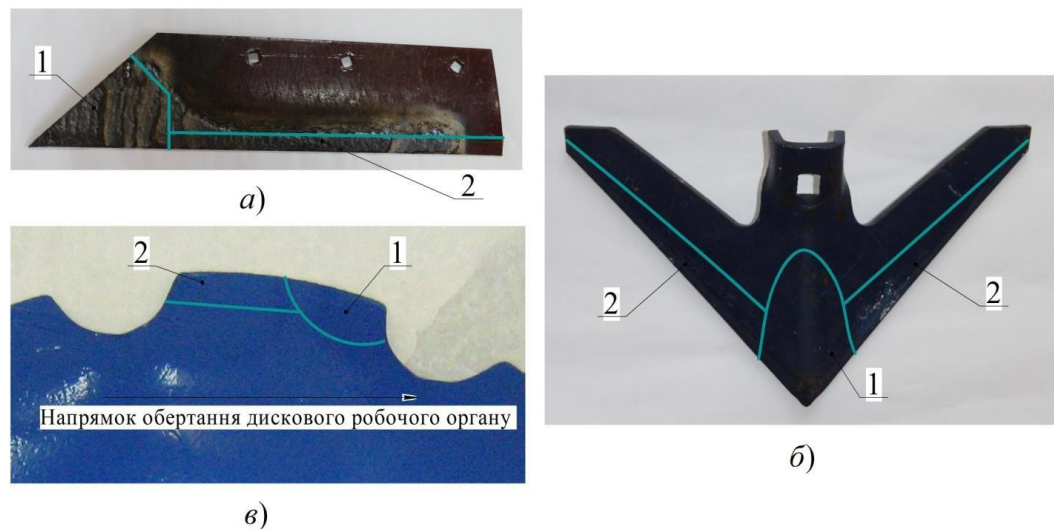


Рис. 2.9. Схеми нанесення зносостійкого покриття на різальні елементи робочих органів ґрунтообробних машин для досягнення ефекту самозагострювання та забезпечення рівностійкості зношування леміша (а), стрілкової лапи (б) та дискового робочого органу (в): 1, 2 – зони нанесення зносостійкого шару

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

Таблиця 2.3

Співвідношення між параметрами зносостійкого шару χ (визначено експериментально)

Ґрунт	Стан ґрунту	Критерій χ		
		Леміш	Стрілчаста 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 суттєво впливає на характер зношування робочих органів ґрунтообробних машин, а отже, і на співвідношення параметрів зносостійкого шару в різних зонах робочих органів. Дослідження критерію χ проведені на агрегатах, які працювали в діапазоні швидкостей 10...11 км/год. За умови подальшого зростання швидкості необхідно вводити корегувальний 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 суттєво впливає не тільки на реалізацію ефекту самозагострювання, а й на довговічність робочих органів. Проведений аналіз дослідних робіт та їх синтез з отриманими даними експлуатаційних досліджень дозволили встановити оптимальні кути загострення робочих органів ґрунтообробних машин. Для лемішів оптимальний кут загострення лезової частини знаходиться в межах $8...10^\circ$, носової частини – $20...27^\circ$, для стрілчатих лап лезової частини $8...10^\circ$, носової частини – $25...30^\circ$, для дискового робочого органу – $28...34^\circ$. Зміцнюючи стрілчатую лапу із зовнішнього боку, загострення крил лапи проводили з внутрішнього боку. Загострювання в усіх випадках проводили одностороннє.

В аналізі наведено суперечливі дані щодо боку нанесення (зовнішню чи внутрішню) зносостійкого матеріалу на стрілчатую лапу, тому для проведення експериментальних досліджень лапи виготовляли з внутрішнім і зовнішнім нанесенням зносостійкого покриття.

Унаслідок проведених експлуатаційних досліджень у всіх робочих органів, які були виготовлені за рекомендаціями наведеними в теоретичних дослідженнях, спостерігався ефект самозагострювання.

Під час експлуатації стрілчатих лап із внутрішнім зносостійким шаром на супіщаних та суглинкових ґрунтах помічено виступ зміцненого шару, який обломлювався взаємодіючи з твердими включеннями в ґрунті. Довговічність таких лап на цих ґрунтах була в 1,6..1,9 раза менша, ніж серійних. На глинистих ґрунтах лапи з внутрішнім зносостійким шаром демонстрували ефект самозагострювання, а довговічність їх була на 2,8% більша за лапи з зовнішнім зносостійким шаром.

Процес самоорганізації (самозагострювання) робочих органів ґрунтообробних машин, досягнутий за рахунок нанесення зносостійкого шару, дозволив суттєво зменшити витрати пального в процесі експлуатації на суглинкових і глинистих ґрунтах та підвищити довговічність на супіщаних і піщаних ґрунтах порівняно з використанням серійних робочих органів.

Одержані результати теоретичних досліджень та експлуатаційних досліджень дозволяють упроваджувати самозагострювальні різальні елементи робочих органів на аграрних підприємствах з урахуванням особливостей експлуатації та типів ґрунтів.

2.4 Вплив абразивного зношування на атмосферну корозію робочих органів ґрунтообробних машин

Підвищити зносостійкість робочих органів ґрунтообробних машин можна трьома групами методів: конструкційними, технологічними, експлуатаційними [4, 16]. До сьогодні переважна більшість досліджень цього напрямку присвячено вивченню конструкційних та технологічних методам (наприклад, створенню нових триботехнічних матеріалів, нанесенню зносостійких покриттів на поверхню металу різними методами, оптимізації геометрії деталей, забезпеченню самоорганізації вузлів тертя і т.д.)

Тертя об ґрунт поверхонь робочих органів ґрунтообробних машин характеризується малими питомими тисками частинок ґрунту на неї та їх сприятливою геометричною формою з відсутністю різальних кромek. У таких обставинах дія абразивних частинок викликає інтенсивну мікропластичну деформацію поверхневих шарів, що сприяє виникненню окиснювального зношування. Однак останнє при цьому характеризується виключно високою інтенсивністю, яка набагато перевищує інтенсивність звичайного окиснювального зношування, що виникає під час роботи трибоспряджень.

Протягом року робочі органи ґрунтообробних машин експлуатують доволі короткий термін, неробочий період становить близько 90% (за даними корпорації «Сварог Вест Груп»). У сільськогосподарському виробництві використовують такі способи зберігання ґрунтообробних машин: на відкритих майданчиках (з асфальтовим, гравійним, бетонним, ґрунтовим і трав'яним покриттям); під навісом (з бетонним, асфальтованим та гравійним покриттям); у закритих приміщеннях (опалювальні й неопалювальні з бетонним та асфальтовим покриттям). Останній спосіб не набув широкого розповсюдження, оскільки потребує додаткових капіталовкладень.

У процесі зберігання робочі органи ґрунтообробних машин піддаються атмосферній корозії й після відновлення експлуатації таких робочих органів інтенсивність їх зношування зростає. У зв'язку з цим захист від корозії необхідно розглядати як важливий фактор підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин.

Дослідження проводились у виробничих умовах Республіки Білорусь на спеціальних зразках. На рис. 5.10 засвідчено результати дослідження з визначенням корозійного руйнування незахищених сталених зразків за різних способів зберігання протягом 20 місяців.

Як видно з рис. 2.10, різниця у величині корозійного руйнування сталей за різних умов зберігання значна. Зокрема, за 20 місяців зберігання втрати металу від корозії в закритому приміщенні для наведених марок сталей становлять 54...64 г/м², на відкритому майданчику 219...316 г/м², а на поверхні ґрунту 280...360 г/м².

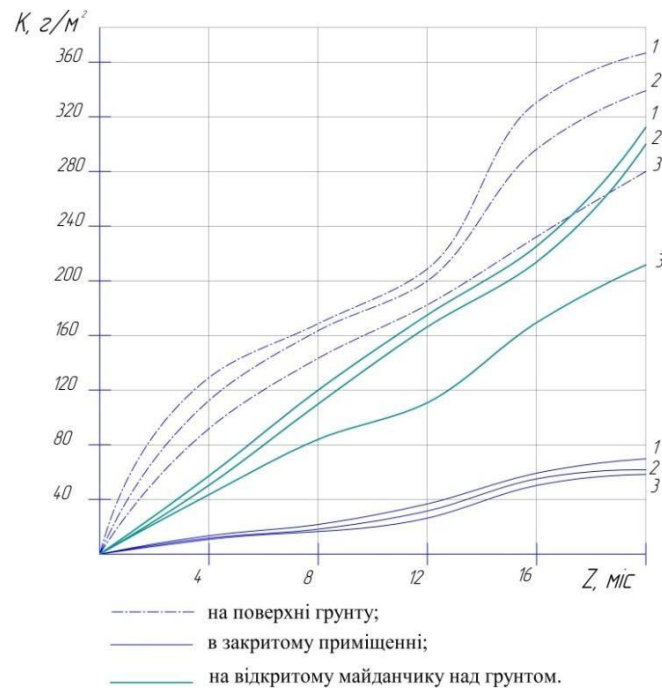


Рис. 2.10. Залежність корозійного руйнування сталей від тривалості та способів їх зберігання: 1 – сталь 3; 2 – сталь 45; 3 – сталь 65Г

Для дослідження впливу попередньої корозії на інтенсивність зношування на зразках сталі 65Г, сталі 45 та сталі 3 з використанням лабораторної установки за способом «гільза». Абразивним середовищем слугував кварцовий пісок (99% якого були частинки розміром 0,16...0,315 мм). Швидкість обертання шпинделя установки – 240 об/хв., питомий тиск зразка на абразив 0,5 кГ/см². Тривалість досліджень – 20 місяців. Зразки знімали для проведення дослідження кожні 4 місяці й зберігали трьома способами: у закритому приміщенні; у відкритому приміщенні над ґрунтом; на поверхні ґрунту. Дослідження проводилися в умовах Республіки Білорусь. У результаті досліджень отримано залежність інтенсивності абразивного зношування сталей від величини корозійного руйнування:

$$J_k = aK^2 + bK + c \quad \text{мг/дм}^2 \cdot \text{хв}, \quad (2.6)$$

де K – величина корозійного руйнування (г/м²);

a , b і c – коефіцієнти, величини яких для різних способів зберігання визначені експериментально.

Незважаючи на велику практичну цінність проведених досліджень, вони мають низку недоліків:

- проводили на сталях, які на сьогодні не використовуються для виробництва робочих органів ґрунтообробних машин (окрім сталі 65Г);
- експерименти здійснювали лише в одній кліматичній зоні;
- у процесі досліджень не враховано впливу способу термічної обробки сталі на інтенсивність корозії;
- в експериментах не взято до уваги можливість нанесення захисних покриттів під час зберігання;
- установка за способом «гільза» не відтворює реальні умови зношування робочих органів ґрунтообробних машин;
- зразки не піддавалися абразивному зношуванню перед зберіганням, що не дозволяє оцінити для опису процесу атмосферної корозії поверхні робочих органів ґрунтообробних машин.

Отримані результати дозволяють зробити такі висновки:

- способи зберігання ґрунтообробних машин розподіляються в таких співвідношеннях:

71% – на відкритих майданчиках (переважно на асфальтованих або бетонних), з них 12% з нанесенням захисного покриття;

29% – під навісом на майданчиках (асфальтованих або бетонних), з них 74% з нанесенням захисного покриття. Як захисне покриття здебільшого (понад 95%) використовують відпрацьоване моторне мастило. Такі результати вказують на необхідність проведення дослідження впливу захисних покриттів на інтенсивність атмосферної корозії робочих органів ґрунтообробних машин;

- у перші дні зберігання ґрунтообробних машин на поверхні робочих органів відсутні явні ознаки атмосферної корозії (рис. 2.11);

- у процесі зберігання атмосферна корозія протікає інтенсивніше на поверхні робочих органів, яка піддається 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 можна пояснити особливостями механізму абразивного зношування, адже взаємодія абразивних частинок ґрунту з поверхнею сталі проявляється переважно в її пластичному деформуванні, а також у формуванні та зношуванні вторинних структур. Тобто в поверхневому шарі сталі утворюються дефекти кристалічної будови, що сприяють утворенню оксидів на поверхні.

Отримані результати свідчать про неможливість використання залежностей для визначення величини корозійного руйнування поверхні робочих органів ґрунтообробних машин залежно від тривалості та способу їх зберігання, оскільки в них не врахований активаційний вплив попереднього абразивного зношування на протікання атмосферної корозії поверхні в реальних умовах.

Висновки по розділу 2

1. На основі синтезу знань з різних наук побудовано фізико-математичну модель трибосистеми «робочий орган – ґрунт», виявлено її специфіку, визначено процеси, які відбуваються внаслідок функціонування системи, встановлено енергетичний і масовий баланс системи й окреслено напрямки, що дозволить суттєво підвищити довговічність та зносостійкість робочих органів ґрунтообробних машин.

2. Приведено результати теоретичних та лабораторних досліджень процесу самоорганізації середовища ґрунту. Встановлено, що в процесі самоорганізації середовища ґрунту відбувається зміна його абразивних властивостей, переважно в бік зростання абразивних властивостей. Зовнішні чинники по-різному впливають на інтенсивність процесу самоорганізації на різних типах ґрунтів. Урахування процесів самоорганізації середовища ґрунту в період експлуатації ґрунтообробних машин сприятиме суттєвому підвищенню їхньої довговічності та зносостійкості.

РОЗДІЛ 3

ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці - це система законодавчих актів і відповідних їм соціально-економічних, технічних, гігієнічних і організаційних заходів, що забезпечують безпеку, збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці [18].

З охороною праці тісно зв'язані пожежна безпека і блискавко захист, тому, що пожежі на виробництві й у побуті і грозові розряди загрожують не тільки матеріальним цінностям, але і життю людей при обробі картоплі. В умовах спеціалізації і концентрації сільськогосподарського виробництва на базі міжгосподарської кооперації й агропромислової інтеграції зростає насиченість села різними машинами і разом з тим стає ще більш важливою гарна підготовка сільських трудівників в галузі техніки безпеки і виробничої санітарії.

3.1 Організація умов та заходів з охорони праці в господарстві

Для створення на робочому місці в кожному структурному підрозділі умов праці відповідно до нормативноправових актів, а також забезпечення додержання вимог законодавства щодо прав працівників у галузі охорони праці роботодавець забезпечує функціонування СУОП – частини загальної системи управління організацією, яка сприяє запобіганню нещасним випадкам та професійним захворюванням на виробництві і включає в себе комплекс правових, організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних, соціальноекономічних та лікувально-профілактичних заходів для збереження життя, здоров'я та працездатності найманих працівників

СУОП підприємства складається з суб'єкта та об'єкта управління, що інформативно зв'язані між собою, а також, заходів і засобів.

Основні принципи політики у сфері охорони праці До них відносять:

- органічне поєднання з усіма елементами діяльності підприємства;
- визначення загальних завдань та зобов'язань керівництва щодо постійного покращення охорони праці, сприяння формуванню громадських органів, інформування працівників про умови праці;
- формування на основі комплексної оцінки рівня небезпеки виробничих

об'єктів;

- відповідність характеру та масштабу ризиків;
- документальне оформлення, доведення до усіх працівників та коригування при змінах у виробничому процесі.

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

При роботі в нічний час відпочивати в борозні, у кабіні трактора при працюючому двигуні не дозволяється. При груповій роботі тракторів визначаються місця відпочинку за межами поля. У разі недомагання необхідно припинити роботу, повідомити керівників і звернутися в медпункт.

Вимоги безпеки до початку роботи

Одягти спецодяг, акуратно його заправити, щоб не було звисаючих кінців. При під'єднанні трактора до причіпної машини людям треба відійти від техніки на відстань не менш як 1,5 м. З'єднання проводити при повній зупинці трактора.

Перед початком запускання двигуна трактора перевірити положення важелів переключення передач та справність блокуючого пристрою.

Починати роботу тільки після ретельної перевірки справності всього агрегату. При запуску пускатчем не дозволяється намотувати мотузку на руку.

Перед початком руху трактора з місця необхідно переконатися, що це нікому не загрожує, подати попереджувачий сигнал. Особливо бути обережним при навішуванні на трактор навісних машин.

Вимоги безпеки під час роботи

При підйманні та опусканні навісного знаряддя, а також при поворотах треба переконатися, що ці дії не створюють небезпеки для інших працівників. Під час руху агрегату сідати, сходити з нього не дозволяється.

Забороняється перебувати під піднятим навісним знаряддям при регулюванні та усуненні неполадок. Не дозволяється залишати навісне знаряддя у піднятому положенні при довгочасних зупинках трактора. На причіпних знаряддях не дозволяється встановлювати допоміжні сидіння, якщо вони не передбачені заводом-виготівачем. При роботі у нічний час трактор повинен мати справне освітлення.

Очищати плуг від бур'янів, налиплого ґрунту тільки після повної зупинки. При боронуванні очищення зубових борін необхідно робити за допомогою гачків. Невиконання цієї вимоги призводить до травмування працівників. При боронуванні поля, яке забруднено рослинними рештками, бур'янами, зубці борін встановлюють скосами в бік руху агрегату, це забезпечує самоочищення борін. Якщо поле чисте, скоси направляються в протилежний бік руху агрегату. При зберіганні зубові борони повинні ставитися зубцями вниз. При застосуванні дискових борін, лушпильників необхідно звертати увагу на правильне встановлення чисток. Зазор між чисткою і диском повинен бути не менше 2 мм.

Заходи безпеки в аварійних ситуаціях

При несправності агрегату негайно його треба зупинити. Якщо стався нещасний випадок, повідомити адміністрацію. Потерпілому надати першу долікарську допомогу. Місце нещасного випадку зберегти без змін до повного розслідування.

Вимоги безпеки після закінчення робіт

Вигнати агрегат із загінки і, по затвердженим у господарстві маршрутам руху, поставити його на місце стоянки. Заглушити двигун, загальмувати трактор, у холодний період року злити воду і впевнитись, що вона повністю витекла з системи охолодження. Очистити агрегат від бруду, пилу, рослинних решток. Оглянути та усунути виявлені недоліки. Зняти одяг, вмитися, по-можливості прийняти душ.

3.3 Висновки по розділу

Розроблено організацію умов та заходів з охорони праці в господарстві для працівників при виконанні робіт. Вивчено методику моделювання процесів при роботі дисковими ґрунтообробними машинами, виникнення небезпечних ситуацій, а саме змодельовано процесу виникнення травми при роботі з експериментальною установкою. Проведений аналіз з вимог безпеки ґрунтообробними машинами.

РОЗДІЛ 4

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

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

Економічну оцінку проводили за отриманим кінцевим результатом, тобто по зростанню довговічності робочих органів ґрунтообробних машин у період їх експлуатації. Робочі органи вибраковували в разі втрати працездатного стану (невиконання агротехнічних вимог).

Унаслідок зміцнення електродом Т-620 довговічність стрілочастих лап зростає в 1,53 раза, а в разі застосування комплексного підходу вирішення цієї проблеми довговічність збільшується в 1,84 раза (тобто на зростання від інших заходів комплексного підходу становить 31%). В інших типах робочих органів ґрунтообробних машин також спостерігається суттєве зростання довговічності від застосування комплексного підходу, порівняно з простим зміцненням робочої поверхні (11% для дискових робочих органів і 18% у процесі експлуатації на супіщаних та 24% у процесі експлуатації на суглинкових ґрунтах для лемешів).

Економічну оцінку підвищення довговічності від упровадження комплексного підходу робили на дисковому універсальному агрегаті УДА-4,5 (табл. 4.1).

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

Економічний ефект для інших ґрунтообробних машин від упровадження запропонованого комплексного підходу підвищення довговічності робочих органів становить 6...18 % від вартості нової машини за період експлуатації одного комплекту робочих органів.

Проведений розрахунок економічного ефекту від упровадження комплексного підходу підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин є орієнтовний і не враховує впливу збереження працездатного стану машини на строки та якість виконання технологічних операцій. Для робочих органів, які визначають надійність ґрунтообробних машин, збереження працездатного стану може суттєво впливати на урожайність сільськогосподарських культур.

Висновки по розділу 4

1. Установлено, що зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин відповідно до розроблених схем і критеріїв дозволяє покращити процес самозагострювання протягом усього терміну експлуатації. Отримані результати засвідчують, що порівняно із серійними кут загострювання різальних елементів зміцнених робочих органів менший для стрілочастих лап на 6...32%, для лемешів на 8...19% та дискових робочих органів до 13%. Самоорганізація зміцнених різальних елементів робочих органів призводить до зменшення витрат дизельного пального, при комплектування мобільних енергетичних засобів з дисковими ґрунтообробними агрегатами в середньому приблизно на 10%, з плугами – 14% та з культиваторами – 11%.

2. Доведено, що застосування комплексного підходу підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин дозволяє підвищити їхню довговічність в 1,84...2,51 раза, та отримувати економічний ефект протягом всього терміну експлуатації в межах 13...18% від вартості нової машини.

ВИСНОВКИ

1. Установлено, що ґрунтообробні машини займають провідне місце в структурі машинно-тракторних парків аграрних підприємств, а їхня надійність і якість виконання технологічних операцій залежить від довговічності та зносостійкості робочих органів. Проведений аналіз робіт вітчизняних та зарубіжних учених з проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин дав змогу з'ясувати, що вирішення цієї проблеми, насамперед, базується на застосуванні зміцнювальних технологій для певних умов експлуатації. Фундаментальне її вирішення обумовлює застосування комплексного підходу з використанням цілого спектра технологічних, конструктивних й експлуатаційних методів підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів з урахуванням умов і режимів експлуатації ґрунтообробних машин.

2. Установлено вплив типу ґрунту, його вологості та наявності біологічної фази на коефіцієнт внутрішнього тертя ґрунту та питоме зчеплення (ступінь закріплення абразивних частинок у ґрунті). Виявлено, що наявність біологічної фази (кореневої системи сільськогосподарських культур) призводить до зростання питомого зчеплення в 1,14–2,72 рази. З'ясовано, що зростання вологості ґрунту буде призводити до росту ступеня закріплення абразивних частинок та коефіцієнта внутрішнього тертя в ґрунті, яке спостерігається до перенасичення ґрунту вологою, а після появи вільної води в ґрунті – ці показники будуть зменшуватися.

3. Установлено, що нанесення зносостійкого покриття дає можливість підвищити довговічність робочих органів ґрунтообробних машин: для зміцнених дискових робочих органів при експлуатації їх на супіщаних ґрунтах довговічність підвищується в 1,28–1,41 рази, на суглинках – в 1,11–1,24 рази та на глинистих ґрунтах – в 1,07–1,18 рази; для зміцнених стрілочастих лап при експлуатації їх на супіщаних ґрунтах довговічність підвищується в 1,41–1,53 рази, на суглинках – в 1,48 рази та на глинистих ґрунтах – в 1,39–1,44 рази; для зміцнених лемішів при експлуатації їх на супіщаних ґрунтах довговічність

підвищується в 1,82–2,13 раза, на суглинках – в 1,5–1,85 раза та на глинистих ґрунтах – в 1,34–1,52 раза. Отже, нанесення зносостійкого покриття на робочі органи ґрунтообробних машин більш ефективно на ґрунтах, які мають вищу зношувальну здатність (супіщані та піщані).

4. Сформульовано основні принципи підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх зносостійкості з урахуванням ґрунтово-кліматичних умов та режимів експлуатації, які дозволяють підвищити довговічність робочих органів ґрунтообробних машин в 1,84–2,51 раза в залежності від типу робочих органів та ґрунтово-кліматичних умов. Економічна оцінка підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх зносостійкості з урахуванням ґрунтово-кліматичних умов та режимів експлуатації засвідчила економію затрат у межах 6–18 % від вартості нової машини протягом експлуатації одного комплекту робочих органів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Tylczak J. H. Abrasive wear. ASM Handbook. *Materials Park, OH, ASM International*. 1992. № 18. Р. 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://hmilniksilmarsh.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).

27. Офіційний сайт Kuhn [Електроний ресурс]. Режим доступу : <http://www.kuhn.ua/> (дата звернення : 14.03.2020).
28. Офіційний сайт Kleine [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://www.grimme.com/de> (дата звернення : 14.03.2020).
29. Офіційний сайт Bellota [Електроний ресурс]. Режим доступу: <https://www.bellota.com/> (дата звернення : 14.03.2020).
30. Сисолін П. В., Сало В. М., Кропівний В. М. . Сільськогосподарські машини: теоретичні основи, конструкція, проектування: Кн. 1 : Машини для рільництва / ред. М. І. Черновол. Київ : Урожай, 2001. 384 с.
31. Morris N. L., Miller P. C. H., Orson J. H., Froud-Williams R. J. The adoption of non-inversion tillage systems in the United Kingdom and the agronomic impact on soil, crops and the environment. *A review. Soil & Tillage Research*. 2010. № 108. Р. 1–15. URL : <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.03.004> (Last accessed : 14.03.2020).
32. Гевко Р. Б., Ткаченко І. Г., Павх І. І. Машини сільськогосподарського виробництва : навч. посіб. Тернопіль, 2005. 228 с.
33. Жук А. Ф., Ревякин Е. Л. Развитие машин для минимальной и нулевой обработки почвы. Научно-аналитический обзор. Москва : Росинформагротех, 2007. 156 с.
34. Инаекян С. А. Научные основы повышения эффективности почвообрабатывающих машин для предпосевной обработки почвы : монография. Москва: ВИСХОМ, 1992. 115 с.
35. Канарёв Ф. М. Ротационные почвообрабатывающие машины и орудия : монография. Москва : Машиностроение, 1983. 142 с.
36. Маматов Ф. М., Мирзаев Б. С. Механико-технологические основы орудий для безотвальной противоэрозионной обработки почвы : монография. Ташкент : Voris-nashriyot, 2015. 126 с.
37. Нартов П. С. Дисковые почвообрабатывающие орудия : монография. Воронеж : Воронежский государственный университет (ВГУ), 1972. 184 с.

38. Синеоков Г. Н., Панов И. М. Теория и расчет почвообрабатывающих машин : Монография. Москва : Машиностроение, 1977. 328 с.
39. Сало В. М., Лещенко С. М., Лузан П. Г., Мачок Ю. В., Богатирьев Д. В. Машины для обробітку ґрунту та внесення добрив : навчальний посібник. Харків : Мачулін, 2016. 244 с.
40. Стрельбицкий В. Ф. Дисковые почвообрабатывающие машины : монография. Москва : Машиностроение, 1978. 135 с.
41. Теслюк Г. В., Волик Б. А., Сокол С. П., Кобець О. М., Семенюта А. М. Ґрунтообробні агрегати на основі дискових робочих органів : монографія. Дніпропетровськ : Акцент П.П., 2016. 143 с.
42. Новиков В. С. Обеспечение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин. дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.03 / Московский государственный агроинженерный университет им. В. П. Горячкина. Москва, 2008. 331 с.
43. Новиков В. С. Упрочнение рабочих органов почвообрабатывающих машин : монография. Москва : ФГБОУ ВПО МГАУ им В. П. Горячкина. 2013. 112 с
44. Бобрицкий В. М. Підвищення зносостійкості різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин : дис. ... канд. тех. наук : 05.02.04 / Кіровоградський національний технічний університет. Кіровоград, 2007. 182 с.
45. Hutchings I. M. Leonardo da Vinci's studies of friction. *Wear*. 2016. P. 51–66.
46. Марков Д. П. Развитие представление о механизмах трения. *Трение и знос*. 2013. Том. 34. №1. С. 87–101.
47. Русско-белорусско-английский толковый словарь в области трения, изнашивания и смазки / под ред. Н. К. Мышкина. Гомель : Инфотрибо, 1996. 173 с.
48. Zum Gahr K.-H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam – Oxford – New York – Tokyo : Elsevier Science Publishers. 1987. 559 p.

49. Шейнман Е. Л. Абразивный износ. Обзор Американской печати. *Трение и износ*. 2005. Том. 26, №1. С. 100–111.
50. Борак К. В. Підвищення зносостійкості робочих органів дискових ґрунтообробних знарядь методом електроерозійної обробки : дис. ... канд. тех. наук : 05.02.04 / Житомирський національний агроекологічний університет. Житомир, 2013. 217 с.
51. Аулін В. В. Напружено-деформований стан ґрунту при його взаємодії з різальними елементами робочих органів ґрунтообробних машин. *Науковий вісник Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*. 2010. №3. С. 6–17.
52. Трение, износ и микротвердость материалов: Избранные работы (к 120 летию со дня рождения) / Отв. ред. И. Г. Горячева. Москва : КРАСАНД, 2012. 512 с.
53. Добровольский А. Г., Кошеленко П. И. Абразивная износостойкость материалов : справочное пособие. Киев : Техника, 1989. 128 с.
54. ГОСТ 23.002 – 78 Обеспечение износостойкости изделий. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. Москва : Издательство стандартов, 1980. 15с.
55. Hokkirigawa K. Kato K. An experimental and theoretical investigation of ploughing, cutting and wedge formation during abrasive wear, *Tribology International*. 1988. Vol. 21, № 1. 51–57.
56. Тененбаум М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию. Москва : Машиностроение, 1976. 271 с.
57. Крагельский И. В. Трение и износ. Москва : Машиностроение, 1968. 480 с.
58. Медеяев И. А., Албагачиев А. Ю., Сорокин Г. М. Физическая природа разрушения материалов при абразивном изнашивании. *Трение и износ*. 2004. Том 25, №2. С. 148–154.
59. Огородникова Н. П. Химическое взаимодействие металлов – меди, железа и марганца с α - и β -аминокислотами в водных и органических средах :

автореф. дис. на получение науч. степени канд. хим. наук : 02.00.04. Ростов-на-Дону, 2010. 24 с.

60. Огородникова Н. П., Старкова Н. Н., Рябухин Ю. И. Поведение стали в кислых средах, содержащих аминокислоты, как модель возможного окислительного растворения железа. *Вестник Астраханского государственного технического университета*. 2006. № 6. С. 51–55.

61. Stawicki T., Kostencki P., Białobrzaska B. Roughness of Ploughshare Working Surface and Mechanisms of Wear during Operation in Various Soils. *Metals*. 2018. № 8. 1042. URL : <https://doi.org/10.3390/met8121042>.

62. Крагельский И. В. Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. Москва : Машиностроение, 1977. 526 с.

63. Костецкий Б. И. Сопротивление изнашиванию деталей машин. Москва-Киев : МАШГИЗ, 1959. 478 с.

64. Рыбакова Л. М. Структура и износостойкость металла. Москва : Машиностроение, 1982. 212 с.

65. Кащеев В. Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. М.: Машиностроение, 1978. 213 с.

66. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. Часть 1. Москва : Физматлит, 2005. 616 с.