

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

БОРАК КОСТЯНТИН ВІКТОРОВИЧ

УДК 631.31

**КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ
ТА ЗНОСОСТІЙКОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ
ГРУНТООБРОБНИХ МАШИН**

05.05.11 «Машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису
Роботу виконано в Поліському національному університеті Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант доктор технічних наук, професор
Дворук Володимир Іванович,
Національний авіаційний університет,
професор кафедри загальної та прикладної фізики

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент НААН
Головач Іван Володимирович,
Національний університет біоресурсів
і природокористування України,
професор кафедри механіки

доктор технічних наук, професор
Журавель Дмитро Павлович,
Таврійський державний агротехнологічний
університет імені Дмитра Моторного,
професор кафедри технічного сервісу
та систем в АПК

доктор технічних наук, доцент
Алфьоров Олексій Ігорович,
Харківський національний технічний університет
сільського господарства імені Петра Василенка,
професор кафедри експлуатації, надійності,
міцності та будівництва імені В. Я. Аніловича

Захист відбудеться «26» квітня 2021 року о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.004.06 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, кімната 301

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розіслано «25» березня 2021 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

І. Л. Роговський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У розвинутих країнах утрати, зумовлені тільки наслідками абразивного зношування, становлять від 1 до 4 % національного валового продукту. 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.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано згідно з пріоритетними тематичними напрямами наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року, а саме – фундаментальні проблеми сучасного матеріалознавства та перспективні технології агропромислового комплексу та переробної промисловості. Дослідження за темою дисертації є частиною комплексної наукової роботи кафедр машино-використання та сервісу технологічних систем Поліського національного університету, за консультативної складової кафедри теоретичної та прикладної фізики Національного авіаційного університету «Забезпечення працездатності

трибомеханічних систем в умовах абразивного зношування» (номер державної реєстрації 0112U003405).

Мета та завдання дослідження. Мета дисертаційного дослідження – підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин шляхом використання комплексного підходу адаптації їх зносостійкості до ґрунтово-кліматичних умов і режимів експлуатації.

Для реалізації поставленої мети вирішено такі основні завдання:

- з'ясувати закономірності протікання процесів у зоні фрикційного контакту «робочий орган – ґрунт» та установити фактори, які істотно впливають на довговічність і зносостійкість робочих органів та визначити перспективні напрями підвищення їх довговічності й зносостійкості;

- розробити методологічні основи вирішення проблеми підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх зносостійкості до ґрунтово-кліматичних умов та режимів експлуатації;

- розробити теоретичні основи підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх зносостійкості;

- шляхом експериментальних досліджень з'ясувати вплив ґрунтово-кліматичних умов та режимів експлуатації на підвищення довговічності і зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин;

- виявити закономірності зміни конструктивних і технологічних параметрів та їхній вплив на підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин;

- обґрунтувати й розробити систему експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин із необхідним рівнем їх надійності;

- дати техніко-економічне обґрунтування запропонованого підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх зносостійкості;

- на основі проведених досліджень розробити рекомендації виробникам та сільськогосподарським підприємствам щодо підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин.

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.

Методи дослідження. Методологічною основою дисертації є сукупність теоретичних та емпіричних методів пізнання, які базуються на системі основних наукових понять, теорій, принципів і законів. Теоретичні дослідження ґрунтовані на використанні методів теорії ймовірності та математичної статистики, синергетики, надійності машин, фізики твердого тіла, системного та комплексного підходів вирішення проблеми підвищення довговічності. Лабораторні, стендові й експлуатаційні дослідження проведено із застосування стандартних та розроблених методик. Обробку й аналіз результатів

експериментальних досліджень виконано із застосування методів математичного аналізу, теорії ймовірності, математичної статистики та планування експерименту із застосуванням прикладних комп'ютерних програм.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в обґрунтуванні, подальшому розвитку та вирішенні науково-прикладної проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин, яка, на відміну від відомих раніше, враховує комплексний підхід адаптації їх зносостійкості на різних етапах їх життєвого циклу.

Вперше запропоновано комплексний підхід адаптації зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин з урахуванням ґрунтово-кліматичних умов та режимів експлуатації, що дозволяє підвищити їхню довговічність конструктивними, технологічними та експлуатаційними методами до необхідного рівня.

Вперше встановлено закономірності впливу властивостей середовища ґрунту, з урахуванням складових його елементів, процесів самоорганізації та режимів експлуатації на закономірність зміни геометричних параметрів та фізико-механічних властивостей матеріалу робочих органів ґрунтообробних машин, що дає змогу обґрунтувати та розробити систему експлуатації для підвищення їх зносостійкості та довговічності.

Вперше визначено значення критеріїв досягнення рівності зношування лемішно-лапових та дискових робочих органів з урахуванням сукупності значимих факторів, які використовуються при оптимізації параметрів зміцнення.

Вперше отримано теоретичну залежність коефіцієнта тертя між середовищем ґрунту і поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин та виявлено закономірності процесу зношування від ступеня закріплення абразивних частинок ґрунту, які дозволяють прогнозувати вплив середовища ґрунту на інтенсивність зміни геометричних параметрів та фізико-механічних властивостей матеріалу робочих органів ґрунтообробних машин.

Удосконалено умови досягнення ефекту самозагострювання лемішно-лапових та дискових робочих органів ґрунтообробних машин з урахуванням ґрунтово-кліматичних умов та режимів експлуатації, що дозволяють проєктувати робочі органи ґрунтообробних машин із підвищеною зносостійкістю та довговічністю.

Удосконалено методи дослідження абразивних властивостей середовища ґрунту та визначення впливу атмосферної корозії на закономірність зміни геометричних параметрів та фізико-механічних властивостей матеріалу робочих органів ґрунтообробних машин, що обумовлює визначення ступеня адаптації робочих органів ґрунтообробних машин до ґрунтово-кліматичних умов і режимів експлуатації.

Одержали подальший розвиток закономірності протікання процесів у зоні фрикційного контакту між середовищем ґрунту та робочим органом ґрунтообробних машин, що дає можливість визначити оптимальні режими експлуатації при даних умовах.

Одержали подальший розвиток закономірності фрикційної взаємодії між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин та рослинними рештками, що дозволяє виявити вплив рослинних решток на інтенсивність зношування.

Практичне значення одержаних результатів. На основі проведених експериментальних досліджень вирішено проблему підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх зносостійкості: визначено геометричні та фізико-механічні параметри матеріалу робочих органів ґрунтообробних машин та зносостійкого шару; запропоновано режими експлуатації ґрунтообробних машин, які сприятимуть зменшенню інтенсивності зношування їхніх робочих органів; визначено способи зберігання ґрунтообробних машин, які дозволять підвищити довговічність їхніх робочих органів; описано умови досягнення ефекту самозагострювання для лемішно-лапових і дискових робочих органів ґрунтообробних машин з урахуванням умов та режимів експлуатації.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено у виробництво в СФГ «Шар» Козятинського району Вінницької області, ТОВ «ВП Полісся» Овруцького району Житомирської області, ТОВ «Аграрні системні технології» Попільнянського району Житомирської області, а також в освітній процес у Поліському національному університеті та Житомирському агротехнічному коледжі для підготовки фахівців за освітньо-професійною програмою «Агроінженерія» спеціальності 208 «Агроінженерія» освітнього ступеня «Бакалавр».

Особистий внесок здобувача. Теоретичні положення та експериментальні результати дисертації, які виносяться на захист, одержано здобувачем особисто. Із наукових праць, опублікованих у співавторстві, використано результати, отримані здобувачем особисто.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертації було обговорено та схвалено на: міжнародних наукових конференціях «Сучасні проблеми землеробської механіки» (м. Київ, 2015 р., м. Суми, 2016 р., м. Миколаїв, 2019 р.); міжнародних науково-технічних конференціях «Крамаровські читання» (м. Київ, 2015 р., 2018–2020 рр.); міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (м. Кропивницький, 2015 р., 2017 р.); міжнародних інтернет-конференціях «Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій» (м. Вінниця, 2015–2018 рр.); Міжнародній науково-практичній конференції «Аграрна наука та освіта Поділля» (м. Кам'янець-Подільський, 2017 р.); Міжнародній науковій конференції «Раціональне використання енергії в техніці» (м. Київ, 2017 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве» (м. Мінськ, Республіка Білорусь, 2017 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Аграрна наука та освіта в умовах євроінтеграції» (м. Кам'янець-Подільський, 2018 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні розробки в аграрній сфері» (м. Харків, 2017 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Цілі сталого розвитку третього тисячоліття» (м. Київ, 2018 р.); Міжнародній науково-практичній

конференції «Молодь в технічний прогрес в АПК» (м. Харків, 2019 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Підвищення надійності машин і обладнання» (м. Кропивницький, 2019 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційні технології в АПК» (м. Луцьк, 2017 р.); всеукраїнських науково-практичних конференціях студентів, аспірантів та молодих учених «Підвищення надійності машин і обладнання» (м. Кропивницький, 2014–2018 рр.); Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів та молодих науковців «Перші наукові кроки – 2015» (м. Кам'янець-Подільський, 2015 р.); науково-практичній конференції факультету інженерії та енергетики Житомирського національного агроекологічного університету «Біоенергетичні системи в агропромисловому виробництві» (м. Житомир, 2017 р.); науково-практичній конференції викладачів, аспірантів та студентів Сумського національного аграрного університету (м. Суми, 2017 р.).

Публікації. Основні результати досліджень опубліковано в 58 наукових працях, з яких 20 статей у наукових фахових виданнях України, у тому числі включених до міжнародних наукометричних баз даних, 3 статті у наукових виданнях інших держав, стаття в іншому науковому виданні України, 3 патенти України на корисну модель, 31 теза наукових доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотацій, вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 380 сторінок. Дисертація містить 125 рисунків та 64 таблиці. Список використаних джерел налічує 350 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «Сучасний стан проблеми підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин» з'ясовано, що ґрунтообробні машини займають провідне місце в структурі машинно-тракторних парків сучасних сільськогосподарських підприємств. Надійність такої техніки і якість виконання технологічної операції обробітку ґрунту залежить від довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. Установлено, що втрата працездатного стану робочих органів ґрунтообробних машин відбувається внаслідок зміни їхніх геометричних параметрів і фізико-механічних властивостей матеріалу в процесі абразивного та ударно-абразивного зношування. Зважаючи на механізм і характер зношування робочих органів ґрунтообробних машин під час розроблення заходів із підвищення їх довговічності та зносостійкості, робочі органи доцільно розділити на три групи: дискові, лемішно-лапові й активні. В даній роботі основна увага зосереджена на лемішно-лапових і дискових робочих органах ґрунтообробних машин. Значний внесок у вирішення проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів, які працюють в ґрунтовому середовищі, з'ясування механізмів протікання абразивного зношування здійснили М. М. Сєверньов, R. C. D. Richardson, M. A. Moore, I. B. Головач, В. М. Ткачов, С. А. Сідоров, Д. П. Журавель, М. М. Тененбаум, В. С. Новіков,

А. М. Михальченков, О. І. Алфьоров. Аналіз досліджень вказаних та інших авторів дав змогу виявити низку невирішених питань, зокрема встановити, що в процесі розроблення заходів із підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин дослідники сконцентрували увагу на технологічних і конструктивних методах для певного робочого органу та конкретних умовах і режимах експлуатації ґрунтообробної техніки. Такий підхід не дає можливості застосовувати розроблені заходи під час зміни типу робочого органу та/або умов і режимів експлуатації. Суттєвого підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин можна досягнути завдяки розробленню та впровадженню комплексного підходу адаптації їх зносостійкості з урахуванням ґрунтово-кліматичних умов і режимів експлуатації.

У другому розділі **«Методологія розв'язання проблеми підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх зносостійкості»** наведено розроблену методологію вирішення науково-прикладної проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин, структуру, методи та методики теоретичних й експериментальних досліджень, представлено характеристику обладнання, устаткування та машини для лабораторних і польових досліджень.

Обґрунтовано, що для ефективного вирішення цієї проблеми необхідно використати комплексний підхід, із застосуванням технологічних і конструктивних методів з урахуванням умов роботи та впровадження науково обґрунтованої системи їх експлуатації. Підкреслено, що процес вирішення такої проблеми відбувався поетапно згідно з розробленою схемою.

Відповідно до сформованих завдань програма дослідження та вирішення проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин містить у собі такі етапи:

– дослідження в лабораторних умовах: механічних, фізико-хімічних і зносостійких властивостей матеріалів робочих органів ґрунтообробних машин; коефіцієнта тертя в системах «рослинні рештки – матеріал робочого органу» та «ґрунт – матеріал робочого органу»; процесу самоорганізації ґрунтового середовища;

– визначення впливу в лабораторно-польових умовах: рослинних решток на зношувальну здатність ґрунтового середовища; коефіцієнта форми абразивних частинок ґрунту на інтенсивність зношування матеріалів; ступеня закріплення абразивних частинок у ґрунті на абразивну здатність ґрунту; попередньої корозії на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин; абразивного зношування на інтенсивність корозії робочих органів ґрунтообробних машин;

– в експлуатаційних умовах визначили: вплив умов і режимів експлуатації на зносостійкість та довговічність робочих органів ґрунтообробних машин; умови самозагострювання та рівностійкості зношування робочих органів ґрунтообробних машин.

З'ясовано, що теоретичні дослідження ґрунтуються на використанні методів теорії ймовірності та математичної статистики, синергетики, надійності машин, фізики твердого тіла, системного і комплексного підходів вирішення проблеми підвищення довговічності та зносостійкості.

Основними методами аналізу отриманих результатів експериментальних досліджень слугували: аналітичний, графічний та графоаналітичний. Планування досліджень та обробку отриманих результатів проводили відповідно до загальновідомих методів і методик.

У третьому розділі «**Теоретично-прикладні основи підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх зносостійкості**» розроблено математичну модель підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх зносостійкості з урахуванням умов та режимів експлуатації, фізико-математичну модель функціонування системи «робочий орган – ґрунт», аналітичну модель визначення коефіцієнта тертя між ґрунтом і поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин, наукові основи досягнення ефекту самозагострювання та рівностійкості зношування, встановлено вплив ступеня закріплення абразивних частинок у ґрунті на механізм і характер абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин.

Для робочих органів ґрунтообробних машин можливе існування двох закономірностей зношування (рис. 1). Функція зносу серійних робочих органів має нелінійний характер, а зміцнених робочих органів – лінійний характер. Відхилення функції зносу серійних і зміцнених робочих органів ґрунтообробних машин оцінимо площею складної фігури, утвореної кривими в інтервалі $[0; t_1]$:

$$S = \int_0^{t_1} (at^2 + bt + c - c - \gamma t) dt = \int_0^{t_1} (at^2 + bt - \gamma t) dt = \left(\frac{at^3}{3} - \frac{bt^2}{2} - \frac{\gamma t^2}{2} \right) \Big|_0^{t_1} = \frac{at_1^3}{3} - \frac{bt_1^2}{2} - \frac{\gamma t_1^2}{2}, \quad (1)$$

де t_1 – напрацювання, після якого функція зносу серійних робочих органів набуває лінійного характеру; c – початковий знос, мм; a, b – параметри $[a]=\text{мм/га}^2$, $[b]=\text{мм/га}$; γ – параметр, $\gamma \in (0; t_{п.з.})$, що характеризує кут нахилу прямої (для проміжку $[0; t_{п.з.}]$, $[\gamma]=\text{мм/с}$).

Для досягнення ефекту самозагострювання залежність лінійного зносу робочих органів від часу повинна мати вигляд кривої 2 (рис. 1). Це зумовлює проведення зміцнення однієї із сторін робочих органів із забезпеченням початкової форми крайки різальних елементів, яка буде підтримуватися протягом усього терміну експлуатації. З математичного погляду для досягнення ефекту самозагострювання серійних робочих органів необхідно розробити заходи, що дозволять $S \rightarrow 0$, а для підвищення довговічності робочих органів необхідно, щоб параметр кривої 2 $\gamma \rightarrow \min$.

Підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх зносостійкості, з урахуванням умов та режимів експлуатації, передбачає розгляд впливу всіх значущих факторів у процесі експлуатації. Оскільки довговічність робочих органів ґрунтообробних машин, передусім, визначається їх зносостійкістю, доцільно розглядати вплив

значущих факторів на величину зносу. При цьому знос розглядаємо як функцію від напрацювання $U(t)$, t – напрацювання одного робочого органу, га. При експлуатації та зберіганні ця функція буде мати чотири складові:

$$U_{\Sigma} = U(t) = U_1(t) + U_2(t) + U_3(t) + U_4(t), \quad (2)$$

де $U_1(t)$ – знос робочого органу, який залежить від конструктивних і технологічних методів підвищення зносостійкості; $U_2(t)$ – знос робочого органу, обумовлений режимом експлуатації; $U_3(t)$ – знос робочого органу, який визначається ґрунтово-кліматичними умовами експлуатації; $U_4(t)$ – знос робочого органу, залежний від способу та умов зберігання.

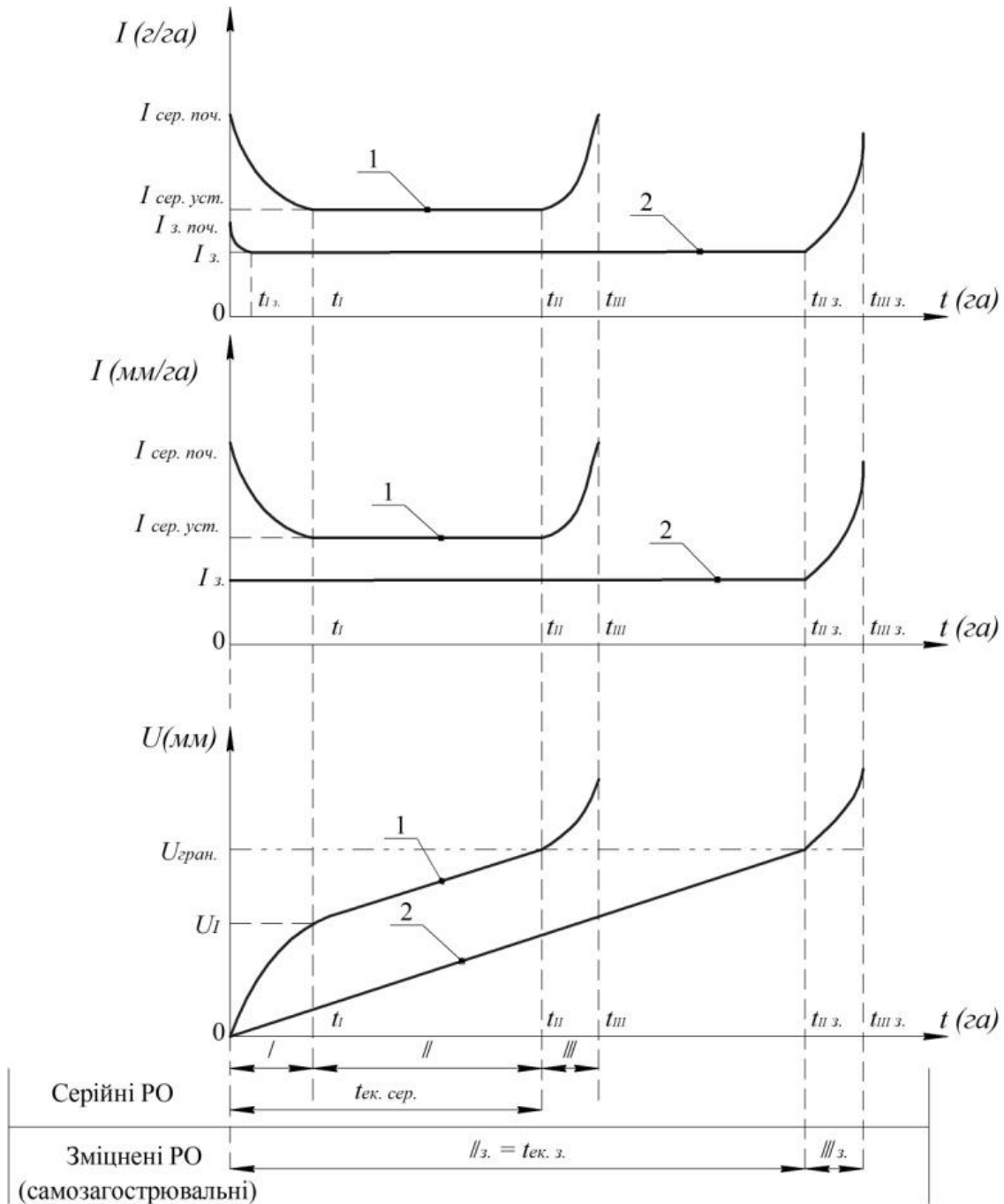


Рис. 1. Типові криві зміни зносу та швидкості зношування робочих органів ґрунтообробних машин у часі: 1 – серійні робочі органи; 2 – зміцнені (здатні до самоорганізації) робочі органи

Ураховуючи напівемпіричний характер залежності функції зносу серійних робочих органів, маємо:

$$U_1(t) = K_1(a_1t^2 + b_1t + c_1), \quad (3)$$

де $K_1 = \sum_{i=1}^6 K_{1i}$ – коефіцієнт, що враховує конструктивні та технологічні методи підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин; a_1, b_1, c_1 – параметри, які визначаються експериментальним шляхом, ($[a_1] = \frac{\text{мм}}{\text{га}^2}$, $[b_1] = \text{мм/га}$, $[c_1] = \text{мм}$);

$$K_1 = \begin{cases} K_{11} - \text{вплив матеріалу робочого органу на величину зносу;} \\ K_{12} - \text{вплив режимів обробки основного матеріалу на величину зносу;} \\ K_{13} - \text{вплив геометричних параметрів робочого органу на величину зносу;} \\ K_{14} - \text{вплив способу зміцнення робочого органу на величину зносу;} \\ K_{15} - \text{вплив ефекту самозагострювання робочого органу на величину зносу;} \\ K_{16} - \text{вплив ріностійкості зношування зон робочого органу на величину зносу.} \end{cases}$$

$$U_2(t) = K_2(a_2v^2 + b_2v + c_2)t, \quad (4)$$

де a_2, b_2, c_2 – параметри, що визначаються експериментальним шляхом ($[a_1] = \text{год}^2/\text{мм} \times \text{га}$, $[b_1] = \text{год/га}$, $[c_1] = \text{мм/га}$.); $K_2 = K_{21}$ – вплив режимів експлуатації (швидкість руху) ґрунтообробного агрегату;

$$U_3(t) = K_3(a_3t^2 + b_3t + c_3), \quad (5)$$

де a_3, b_3, c_3 – параметри, які визначаються експериментальним шляхом, ($[a_3] = \text{мм/га}^2$, $[b_3] = \text{мм/га}$, $[c_3] = \text{мм}$); $K_3 = \sum_{j=1}^3 K_{3j}$ – коефіцієнт, що враховує ґрунтово-кліматичні умови експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин;

$$K_3 = \begin{cases} K_{21} - \text{вплив стану середовища ґрунту на величину зносу;} \\ K_{22} - \text{вплив вологості ґрунту на величину зносу;} \\ K_{23} - \text{вплив стану рослинних решток на величину зносу.} \end{cases}$$

$$U_4(t) = K_4(a_4t^2 + b_4t + c_4), \quad (6)$$

де K_4 – коефіцієнт, який враховує способи та умови зберігання; a_4, b_4, c_4 – параметри, які визначаються експериментальним шляхом, ($[a_4] = \text{мм/га}^2$, $[b_4] = \text{мм/га}$, $[c_4] = \text{мм}$).

Зазначимо, що загалом процеси, що відбуваються в системі «робочий орган – ґрунт» мають стохастичну природу, якщо виконується умова:

$$K_1 + K_2 + K_3 + K_4 = 1. \quad (7)$$

Підставивши вирази (3–6) у формулу (2), отримаємо рівняння зносу для серійних робочих органів:

$$U_{\Sigma}(t) = K_1(a_1t^2 + b_1t + c_1) + K_2(a_2v^2 + b_2v + c_2)t + K_3(a_3t^2 + b_3t + c_3) + K_4(a_4t^2 + b_4t + c_4). \quad (8)$$

Для усталених режимів експлуатації, визначених ґрунтово-кліматичних умов та за дотримання встановлених умов зберігання серійних робочих органів ґрунтообробних машин ($a_1 = a_3 = a_4$; $b_1 = b_3 = b_4$; $c_1 = c_3 = c_4$) рівняння (8) дещо спрощується:

$$U_{\Sigma}(t) = (K_1 + K_3 + K_4)(a_1t^2 + b_1t + c_1) + K_2(a_2v^2 + b_2v + c_2)t. \quad (9)$$

Для зміцнених робочих органів зношування носить лінійний характер. Водночас спостерігаються процеси самозагострювання різальних елементів

грунтообробних робочих органів. Відповідно до рівняння (2) функція зносу набуває вигляду:

$$U_{\Sigma}(t) = K_1' \gamma_1' t + K_2' (a_2' v^2 + b_2' v + c_2') t + K_3' \gamma_3' t + K_4' \gamma_4' t, \quad (10)$$

де $\gamma_1', \gamma_3', \gamma_4'$ – параметри, які визначаються експериментальним шляхом ($[\gamma_1'] = [\gamma_3'] = [\gamma_4'] = \text{мм/га}$); K_1', K_2', K_3', K_4' – відповідні коефіцієнти значущих факторів, що враховують конструктивні та технологічні методи підвищення зносостійкості зміцнених робочих органів ґрунтообробних машин, режими експлуатації, ґрунтово-кліматичні умови експлуатації, способи та умови зберігання відповідно, для яких також виконується умова:

$$K_1' + K_2' + K_3' + K_4' = 1. \quad (11)$$

Для усталених режимів експлуатації, визначених ґрунтово-кліматичних умов та при дотриманні встановлених умов зберігання зміцнених робочих органів ґрунтообробних машин $\gamma_1' = \gamma_3' = \gamma_4'$ рівняння (6) дещо спрощується:

$$U_{\Sigma}(t) = (K_1' + K_3' + K_4') \gamma_1' t + K_2' (a_2' v^2 + b_2' v + c_2') t, \quad (12)$$

Значення параметрів $a_1, b_1, c_1, \gamma_1', \gamma_3', \gamma_4'$, і коефіцієнтів $K_1, K_2, K_3, K_4, K_1', K_2', K_3', K_4'$ визначено за результатами експериментальних досліджень.

У процесі функціонування системи її елементи взаємно впливають один на одного. Їх взаємодія відбувається лише в динамічному стані системи «робочий орган – ґрунт», тоді як у статичному вона відсутня. Схематично процеси, що протікають у динамічному стані системи, зображені на рис. 2, де 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).

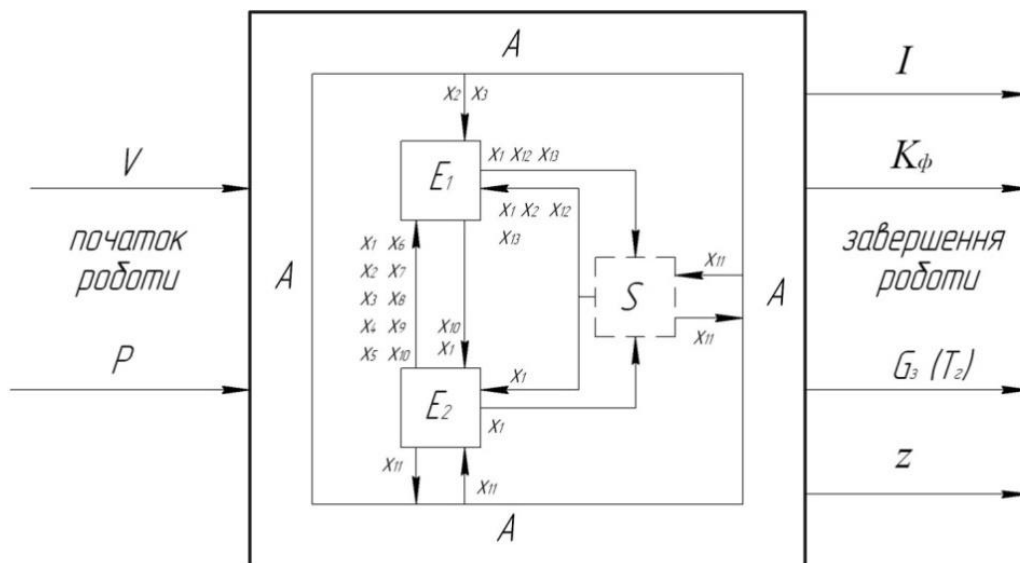


Рис. 2. Структурно-логічна схема системи «робочий орган – ґрунт» у динамічному стані

Виявлено, що найбільшому впливу піддається елемент 1 (робочий орган ґрунтообробної машини) з боку елемента 2 (ґрунту). Інтенсивність протікання вказаних процесів залежить від величини вхідних характеристик (V , P) та початкового стану елементів системи. Метою функціонування системи «робочий орган – ґрунт» на фундаментальному рівні є трансформація її стану: $\{X\} \xrightarrow{T} \{Y\}$. Головний вхід (X) у систему – рух та робота, яку виконує елемент E_1 , а головний вихід – структура елемента E_2 . У реальних умовах отримують багато інших вихідних показників, що є побічними і здебільшого небажаними. Властивості фрикційного контакту елементів суттєво впливають на процеси тертя та зношування в системі, оскільки через дискретність контакту дотик виступів відбувається тільки на окремих ділянках робочої поверхні, які утворюють фактичну зону контакту. Питання фрикційної взаємодії двох твердих тіл вичерпно розкрито в сучасній літературі, але закономірності взаємодії твердого тіла з дисперсним середовищем, а особливо з реальною ґрунтовою масою, залишаються остаточно не розкритими.

Коефіцієнт тертя між ґрунтом і поверхнею робочих органів у класичних і сучасних роботах розглядають тільки з механічної точки зору. Такий однобокий погляд не дає змоги об'єктивно описувати процеси, що протікають на поверхні тертя. Урахування значущих факторів у процесі визначення коефіцієнта тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин уможливить більш якісне їх проектування. Істотним є те, що коефіцієнт тертя між поверхнею робочих органів та ґрунтом складається з коефіцієнта тертя ковзання, тертя кочення і тертя кочення з проковзуванням. З'ясовано, що ймовірність виникнення того чи іншого виду тертя залежить, передусім, від ступеня закріпленості абразивних частинок у ґрунті.

Під час експлуатації ґрунтообробних машин у зоні контакту робочого органу та ґрунту одночасно спостерігаються зазначені види тертя, тому загальний коефіцієнт тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин і ґрунтом дорівнює:

$$f_{\Sigma} = k_1 f_{\text{ковз}} + k_2 \sum_{i=1}^n \frac{f_{\text{коч.}i}}{M_{Ri}} + k_3 f_{\text{коч. з прок.}} \quad (13)$$

$$k_1 + k_2 + k_3 = 1, \quad (14)$$

де f_{Σ} , $f_{\text{ковз}}$, $f_{\text{коч.}i}$, $f_{\text{коч. з прок.}}$ – відповідно загальний коефіцієнт тертя, коефіцієнт тертя ковзання, коефіцієнт тертя кочення, коефіцієнт тертя кочення з проковзуванням між поверхнею робочого органу та ґрунтом; k_1 , k_2 , k_3 – коефіцієнти, що враховують частку, яка припадає на один із видів тертя відповідно; M_{Ri} – математичне очікування радіуса частинок ґрунту, що взаємодіють із поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин.

Дослідження засвідчують, що процеси тертя між ґрунтом та поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин набагато складніші, ніж при фрикційній взаємодії двох твердих тіл, насамперед, це пов'язано зі складною будовою середовища ґрунту.

Визначено, що негативні явища абразивного зношування (процес мікрорізання) спостерігаються при $k_1=1$. У разі випадку абразив жорстко закріплений і не відбувається процес переміщення абразивних частинок

по всьому об'єму абразивної маси. З'ясовано, що при взаємодії робочих органів ґрунтообробних машин із ґрунтом у процесі їх експлуатації коефіцієнт k_1 не може дорівнювати 1. Установлено, що при $k_2=1$ відбувається найменш інтенсивне абразивне зношування внаслідок полідеформаційного руйнування і зношування має втолювальний характер. Виявлено, що при $k_2=1$ в абразивній масі не повинно бути вологи, а абразивні частинки мають ідеально круглу форму з відсутністю речовин, які можуть їх з'єднати. Безумовно, таке абразивне середовище є ідеальним і в реальних умовах експлуатації деталей машин не зустрічається. Крім того, слід відзначити, що в ідеальному абразивному середовищі неможливо досягнути тертя кочення без проковзування, оскільки його частинки та поверхня робочого органу зазнають пружних деформацій: частинки ґрунту стискаються, а матеріал робочого органу підлягає розтягу. Саме тому $k_2 \rightarrow 0$. У зв'язку з неоднорідністю середовища ґрунту, а також відповідно до молекулярно-механічної теорії коефіцієнт тертя ковзання між поверхнею робочого органу та ґрунтом дорівнює:

$$f_{\text{ковз}} = \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i a_i S_{\phi i}}{P} + \sum_{i=1}^n b_i, \quad (15)$$

де a_i – середня інтенсивність молекулярної складової частинок ґрунту; S_{i1} – площа фактичного контакту поверхні робочого органу із складовими частинками ґрунту; β_i – коефіцієнт, що враховують частку, яка припадає на кожен частинку ґрунту; P – сила тиску на поверхню робочого органу внаслідок взаємодії з ґрунтом; b_i – коефіцієнт, який характеризує механічну складову сили тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин і складовими частинками ґрунту.

На відміну від коефіцієнта тертя ковзання, що є безрозмірною величиною, коефіцієнт тертя кочення $f_{\text{коч}}$ має розмірність довжини (м). Величина $f_{\text{коч}}$ залежить від матеріалу елементів системи й визначається тільки дослідним шляхом. Для порівняння коефіцієнта тертя кочення і ковзання використовують показник $f_{\text{коч}}/R$.

На основі теорії проковзування та адгезійної теорії коефіцієнт тертя кочення з проковзування між поверхнею робочого органу й ґрунтом становить:

$$\begin{aligned} f_{\text{коч. з прок.}} &= \psi_1 \left(\frac{f_{\text{коч1}}}{M_{R1}} + \frac{f_{\text{коч2}}}{M_{R2}} + \dots + \frac{f_{\text{кочn}}}{M_{Rn}} \right) + \psi_2 (f_{\text{прок1}} + f_{\text{прок2}} + \dots + f_{\text{прокn}}) + \\ \psi_3 \left(\frac{\beta_1 a_1 S_{\phi 1} + \beta_2 a_2 S_{\phi 2} + \dots + \beta_n a_n S_{\phi n}}{P} \right) &= \psi_1 \left(\frac{f_{\text{коч1}}}{M_{R1}} + \frac{f_{\text{коч2}}}{M_{R2}} + \dots + \frac{f_{\text{кочn}}}{M_{Rn}} \right) + \psi_2 \left(\left(\frac{12F_1}{N} \left(\frac{M_{R1}}{M_{b1}} \right)^2 \right) + \right. \\ &\left. \left(\frac{12F_2}{N} \left(\frac{M_{R2}}{M_{b2}} \right)^2 \right) + \dots + \left(\frac{12F_n}{N} \left(\frac{M_{Rn}}{M_{bn}} \right)^2 \right) \right) + \psi_3 \left(\frac{\beta_1 a_1 S_{\phi 1} + \beta_2 a_2 S_{\phi 2} + \dots + \beta_n a_n S_{\phi n}}{P} \right), \quad (16) \end{aligned}$$

де ψ_1 – коефіцієнт, який урахує тертя кочення без проковзування; ψ_2 – коефіцієнт, що враховує тертя, зумовлене проковзуванням; ψ_3 – коефіцієнт урахування адгезійної складової тертя кочення; F_1, F_1, F_3 – сила тертя, яка обумовлена проковзуванням елементів ґрунтового середовища; N – нормальне навантаження; M_{b1}, M_{b2}, M_{bn} – математичне очікування напівширини контактної площадки, елементів ґрунту; N – нормальне навантаження.

Коефіцієнт тертя ґрунту по поверхні робочих органів ґрунтообробних машин можна вважати випадковою функцією, що змінюється в процесі

функціонування системи «робочий орган – ґрунт». Звичайно, не можна точно передбачити, яким буде коефіцієнт тертя, тому що він залежить від багатьох факторів, характеристик ґрунтового середовища та поверхні робочих органів, спільну дію яких доцільно записати як елементарну подію. Модель функціонування системи «робочий орган – ґрунт» представимо у виді графа, у якому стан (вершини) з'єднанні між собою зв'язками – переходами з i -го стану в j -ий стан (рис. 3), де $S_0, S_1 \dots S_n$ – стан системи, якому відповідає певна величина коефіцієнта тертя ($f_{\text{заг}}$) між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин і ґрунтом; λ_{ij} – щільність імовірності переходу.

Оскільки в процесі взаємодії робочого органу з ґрунтом коефіцієнт тертя змінюється в межах від 0 до 1, то доречно стверджувати, що при 0 коефіцієнт тертя прямує до мінімального значення $f_{\text{заг}} \rightarrow \min$, а при 1 $f_{\text{заг}} \rightarrow \max$, тобто до максимального значення. Під час експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин реальні значення коефіцієнта тертя коливаються в межах 0,2–0,9 і певний стан не може бути пронумерований, отже, маємо безперервний випадковий процес. Унаслідок функціонування системи «робочий орган – ґрунт» для кожного моменту часу t імовірність будь-якого стану системи в майбутньому залежить від її стану в теперішньому й не залежить від того, яким чином система прийшла в цей стан. У такому разі процес доцільно описувати марківським випадковим процесом. Заданий граф (рис. 3) системи «робочий орган – ґрунт» характеризується диференціальними рівняннями Колмогорова:

$$\begin{cases} \frac{dp_0(t)}{dt} = \lambda_{10}p_1(t) + \lambda_{20}p_2(t) + \lambda_{n0}p_n(t) - (\lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda_{0n}) \times p_0(t) \\ \frac{dp_1(t)}{dt} = \lambda_{01}p_0(t) + \lambda_{21}p_2(t) + \lambda_{n1}p_n(t) - (\lambda_{10} + \lambda_{12} + \lambda_{1n}) \times p_1(t) \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = \lambda_{02}p_0(t) + \lambda_{12}p_1(t) + \lambda_{n2}p_n(t) - (\lambda_{20} + \lambda_{21} + \lambda_{2n}) \times p_2(t) \\ \frac{dp_n(t)}{dt} = \lambda_{0n}p_0(t) + \lambda_{1n}p_1(t) + \lambda_{2n}p_n(t) - (\lambda_{n0} + \lambda_{n1} + \lambda_{n2}) \times p_n(t) \end{cases} \quad (17)$$

$$p_0(t) + p_1(t) + p_2(t) + p_n(t) = 1.$$

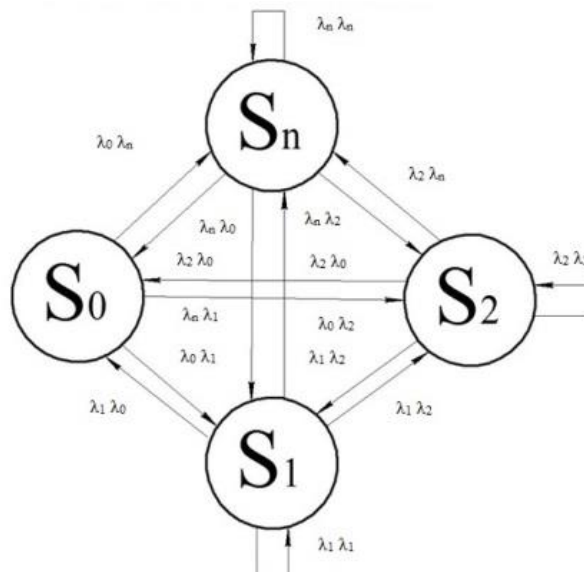


Рис. 3. Процес функціонування системи «робочий орган – ґрунт»

Для такої системи рівнянь (17) матрицю суміжності можна подати у вигляді:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Система «робочий орган – ґрунт» перед початком роботи, коли відсутній процес тертя, має такі умови, стан S_0 : $p_0(0) = 1$, $p_1(0) = p_2(0) = p_n(0) = 0$. У граничному стані $t \rightarrow \infty$, імовірності $p_0, p_1, p_2 \dots p_n$ підтверджують середню відносну тривалість системи в цьому стані. Система рівнянь Колмогорова (17) дає змогу знаходити всі ймовірності значення коефіцієнтів тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин та ґрунтом як функції часу.

Унаслідок проведених теоретичних досліджень встановлено, що процес тертя між ґрунтом і поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин не можна описати законом Амонтова-Кулона, оскільки він ураховує тільки механічну складову процесу тертя. Під час визначення загального коефіцієнта тертя система диференціальних рівнянь (16) дає змогу врахувати всі види тертя, які відбуваються на поверхні, та адгезійну складову процесу тертя, а система рівнянь (17) – знаходити всі ймовірності значення коефіцієнтів тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин і ґрунтом як функції часу.

При експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин у розпушеному ґрунтовому середовищі (передпосівний обробіток, боронування у два сліди і т. д.) виникає ймовірність взаємодії поверхні робочих органів ґрунтообробних машин з незакріпленими абразивними частинками. Під час взаємодії незакріплених абразивних частинок з поверхнею робочих органів можливе протікання двох видів тертя: кочення з проковзуванням та тертя ковзання. На поверхні тертя відбувається пластична деформація поверхні металу, а зношування поверхні має втомлювальний характер. Величина пластичної деформації залежить від площі контакту між абразивною частинкою та поверхнею робочого органу, що зі свого боку визначається формою абразивної частинки. Імовірність взаємодії поверхні робочих органів ґрунтообробних машин з «вільними» абразивними частинками невисока, більш імовірними є різні варіанти фіксації абразивних частинок. Визначено, що виникнення процесу мікрорізання залежить від збігу несприятливих факторів абразивного зношування в процесі експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин.

Оскільки абразивні властивості ґрунту змінюються в часі, запропоновано досліджувати ймовірнісний стан такої системи у фіксованому інтервалі часу. Прогнозування зміни абразивних властивостей ґрунтів здійснено на основі експериментального методу. Лабораторні дослідження проведено в закритому приміщенні з постійною температурою. Імітацію таких зовнішніх чинників, як опади та дія рушіїв сільськогосподарських машин виконували через 24 год від початку дослідження. За результатами проведених досліджень побудовано графічні залежності прогнозування зміни абразивних властивостей ґрунтів (рис. 4).

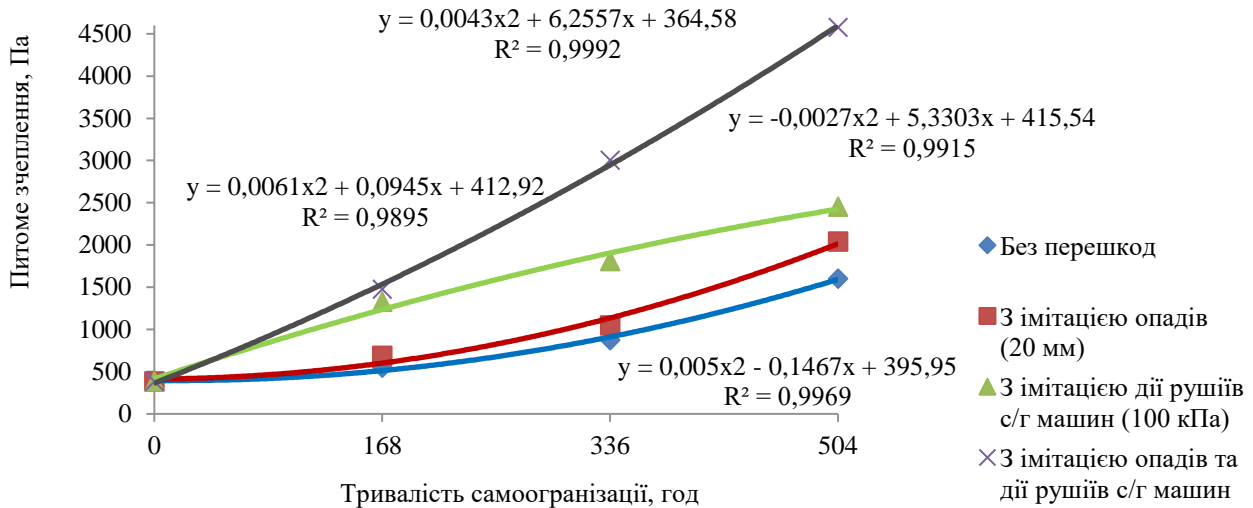


Рис. 4. Зміна питомого зчеплення для піщаних ґрунтів у результаті самоорганізації ґрунтового середовища

З'ясовано, що зазначені зовнішні чинники суттєво прискорюють процеси самоорганізації. Так, зокрема, наявність імітації опадів інтенсифікує процес самоорганізації на 19,7–54,5 %, а імітація дії рушіїв сільськогосподарських машин – в 1,53–2,52 раза.

На піщаних ґрунтах зростання питомого тиску від імітації дії рушіїв сільськогосподарських машин призводить до більш суттєвого зростання, у 2,01–2,18 раза, величини питомого зчеплення порівняно із супіщаними – в 1,64–1,72 раза та глинистими – в 1,58–1,81 раза (рис. 5).

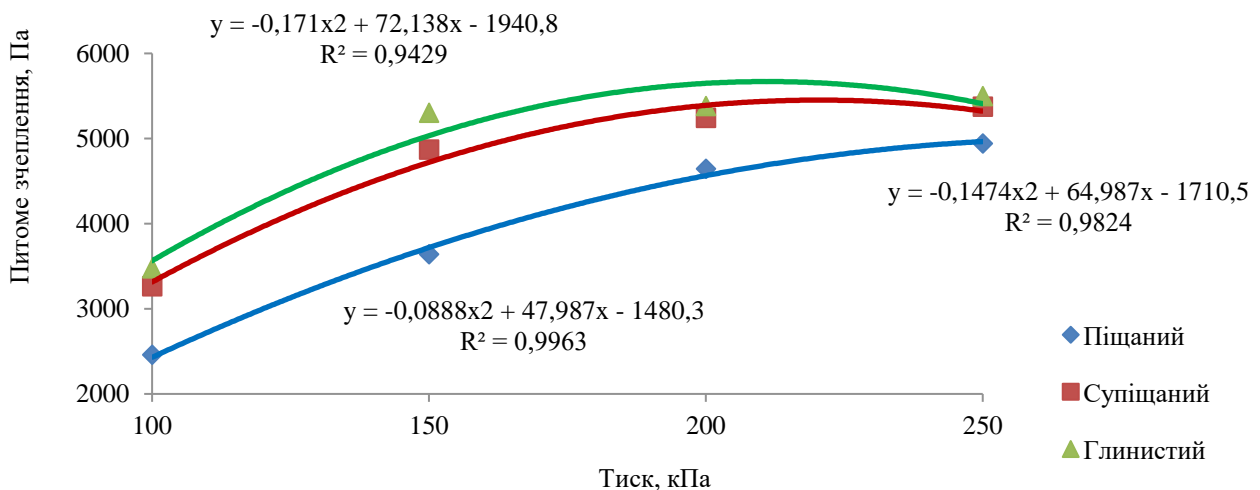


Рис. 5. Зміна питомого зчеплення для різних типів ґрунтів залежно від величини питомого тиску, що імітує дії рушіїв сільськогосподарських машин (час проведення дослідження $t_4=504$ год)

Зростання часу імітації дії рушіїв на ґрунт (збільшення часу дії питомого тиску на поверхню ґрунту) призводить до інтенсифікації процесів самоорганізації в ґрунті, зростання величини питомого зчеплення та ступеня закріплення абразивних частинок, що зі свого боку призводить до збільшення зношувальної здатності ґрунту (рис. 6). Визначено, що збільшення часу дії

питомого тиску від 2 до 8 хв призводить до зростання питомого зчеплення в 1,4–1,75 раза.

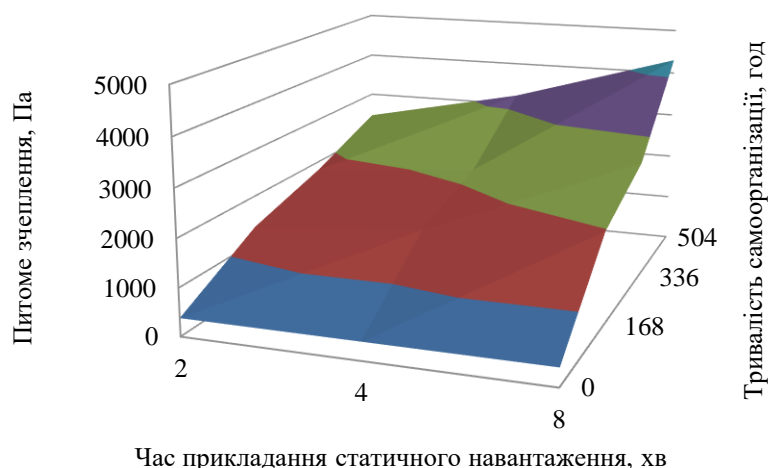


Рис. 6. Поверхня відгуку впливу часу прикладання статичного навантаження та часу самоорганізації ґрунту на величину питомого зчеплення

Крім того, результати досліджень засвідчують, що на величину зношувальної здатності ґрунтів та інтенсивність процесу самоорганізації суттєво впливає наявність води. На глинистих ґрунтах зростання кількості опадів зумовлює істотне зростання величини питомого зчеплення (в 1,2–1,84 раза) порівняно із супіщаними (в 1,21–1,53 раза) та глинистими ґрунтами (1,2–1,43 рази).

На основі аналізу зношених серійних робочих органів, аналізу результатів досліджень учених і практичного досвіду аграрних підприємств, у яких експлуатуються ґрунтообробні машини встановлено значення критерію самозагострювання ω для різних типів робочих органів ґрунтообробних машин з урахуванням типу та стану ґрунтів (табл. 1).

Таблиця 1

Критерій самозагострювання ω (визначений експериментально)

Ґрунт	Стан ґрунту	Значення критерію ω		
		Леміш	Стрілчаста лапа культиватора	Дисковий робочий орган
Супіщаний	Поле після збирання сільсько-господарських 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 сільсько-господарських 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 сільсько-господарських культур	1,5–1,6	1,35–1,45	1,8–1,9
	Пухкий ґрунт	–	1,2–1,3	1,45–1,55

Визначений інтервал значень критерію ω повинен забезпечувати не тільки можливість самозагострювання різальних елементів робочих органів, але і їх рівностійкість зношування. Зауважимо, що критерій самозагострювання

визначає співвідношення зносостійкості та товщини зносостійкого й несучого шарів робочих органів. Інтервали зміни обумовлені результатами експериментальних досліджень характеру зношування робочих органів ґрунтообробних машин, який залежить від абразивних властивостей ґрунту та режимів експлуатації.

Оскільки критерій ω формує співвідношення фізико-механічних характеристик по всій поверхні робочих органів ґрунтообробних машин, не враховуючи особливостей зношування різних локальних зон, запропоновано розділити поверхню робочих органів ґрунтообробних машин на зони (рис. 7) для забезпечення самоорганізації. Зазначений метод дозволить досягнути самозагострювання і рівностійкості зношування, а отже, підвищить довговічність та забезпечить якісний обробіток ґрунту протягом всього терміну експлуатації. Для досягнення ефекту самозагострювання різальних елементів робочих органів і рівностійкості зношування запропоновано зміцнювати поверхню тертя у відповідності до критерію, який враховує інтенсивність зношування визначених локальних зон:

$$\chi = \frac{\varepsilon_{13} \cdot h_{13}}{\varepsilon_{23} \cdot h_{23}}, \quad (19)$$

де ε_{13} – зносостійкість зміцнювального покриття зони 1; ε_{23} – зносостійкість зміцнювального покриття зони 2; h_{13} – товщина зміцнювального покриття зони 1; h_{23} – товщина зміцнювального покриття зони 2.

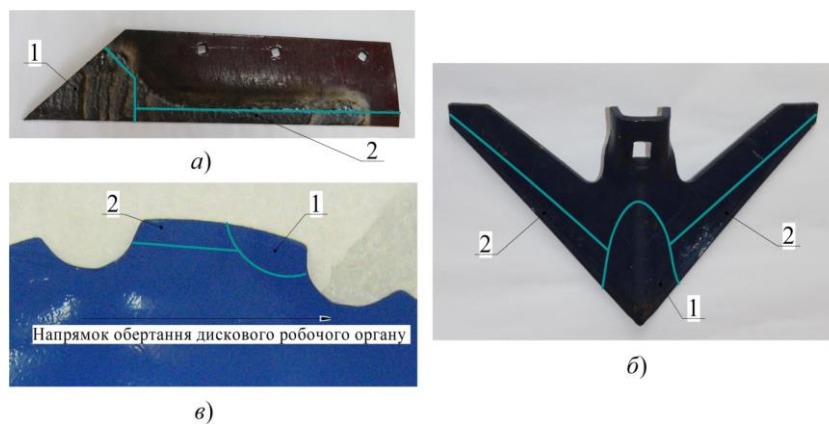


Рис. 7. Схеми нанесення зносостійкого покриття на різальні елементи робочих органів ґрунтообробних машин для досягнення ефекту самозагострювання та забезпечення рівностійкості зношування леміша (а), стрілкової лапи (б) та дискового робочого органу (в): 1, 2 – зони нанесення зносостійкого шару

Значення критерію χ для різних типів ґрунтів з урахуванням їх стану наведено в табл. 2.

З'ясовано, що 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 проведено на агрегатах, які працювали в діапазоні швидкостей 10–11 км/год.

Інтервали значення критерію χ (визначено експериментально)

Грунт	Стан ґрунту	Значення критерію χ		
		Леміш	Стрілчаста лапа культиватора	Дисковий робочий орган
Супіщаний	Поле після збирання сільсько-господарських 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 сільсько-господарських 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 сільсько-господарських культур	2,35–2,45	2,40–2,50	2,10–2,15
	Пухкий ґрунт	–	1,80–1,90	1,55–1,65

При подальшому зростанні швидкості необхідно ввести поправочний коефіцієнт Ω , який визначається за формулою:

$$\Omega = (V_{роб} - V_{поч}) \times \beta \quad (20)$$

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

Результати дослідження показують, що початковий кут загострення робочих органів ґрунтообробних машин істотно впливає не тільки на реалізацію ефекту самозагострювання, а й на довговічність робочих органів. Для лемішів оптимальний кут загострення лезової частини знаходиться в межах 8–10°, носової частини – 20–27°, для стрілчастих лап лезової частини – 8–10°, носової частини – 25–30°, для дискового робочого органу – 28–34°.

У четвертому розділі «**Вплив середовища ґрунту на зносостійкість та довговічність робочих органів ґрунтообробних машин**» встановлено величини значущих абразивних характеристик середовища ґрунту та їхній вплив на довговічність і зносостійкість робочих органів ґрунтообробних машин.

Експериментальними дослідженнями визначено вплив типу ґрунту, його вологості та наявності рослинних решток (кореневої системи) на величину коефіцієнта внутрішнього тертя і питомого зчеплення (ступеня закріплення абразивних частинок). Виявлено, що наявність кореневої системи суттєво підвищує коефіцієнт внутрішнього тертя та питомого зчеплення c (ступінь закріплення абразивних частинок ґрунту). Зокрема, на піщаних ґрунтах наявність кореневої системи кукурудзи на глибині 100 мм підвищує значення коефіцієнта внутрішнього тертя та питомого зчеплення в 1,95 і 2,72 раза відповідно, а на глинистих ґрунтах наявність кореневої системи пшениці в 1,39 та 1,14 раза відповідно. Суттєва різниця в значеннях пояснюється відмінністю кореневої системи пшениці та кукурудзи.

Зростання ступеня закріплення абразивних частинок призводить до зростання ймовірності зняття мікростружки металу з поверхні робочих

органів ґрунтообробних машин, що, в свою чергу, призведе до росту інтенсивності зношування поверхні та зменшення зносостійкості та довговічності робочих органів ґрунтообробних машин (рис. 8).

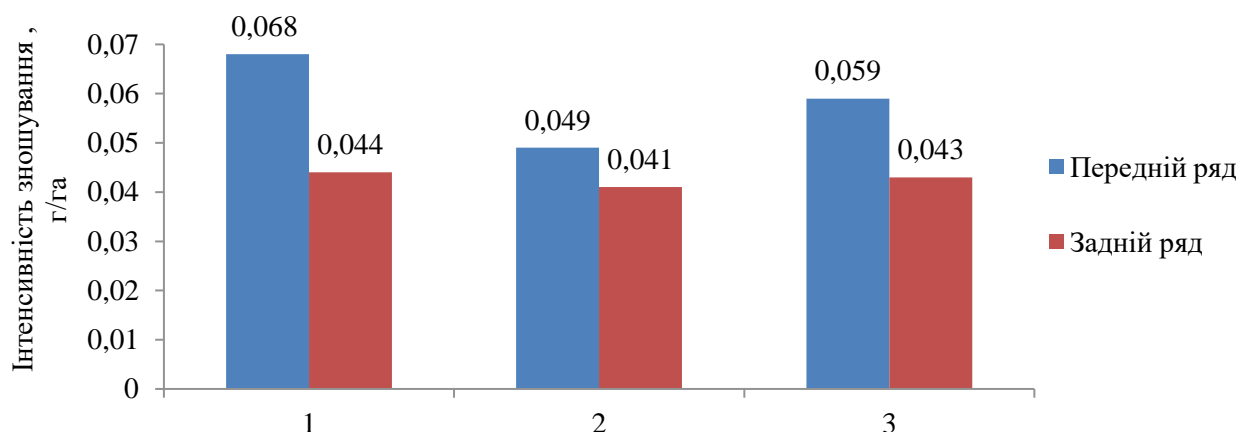


Рис. 8. Інтенсивність зношування першого та другого ряду робочих органів універсального дискового агрегату УДА 4,5 (ґрунт супіщаний, матеріал робочого органу сталь 65): 1 – ділянка після озимої пшениці; 2 – ділянка після озимої пшениці, повторне боронування на 2 день після першого обробітку; 3 – ділянка після озимої пшениці, повторне боронування на 21 день після першого обробітку

Можна бачити, що зменшення ступеня закріплення абразивних частинок ґрунту призводить до зменшення інтенсивності зношування. Так, при повторному боронуванні на другий день перший ряд дисків зношувався на 28 % повільніше. Для другого ряду дисків така закономірність менш виражена (тільки 7 %), оскільки і при першому обробітку взаємодіяли з обробленим ґрунтом.

В результаті процесу самоорганізації середовища ґрунту (протягом двох тижнів) зростання абразивних властивостей призвело до інтенсифікації зношування робочих органів ґрунтообробних машин на 20 % в порівнянні з роботою на ґрунті, якому було не достатньо часу для самоорганізації (варіанти 2 і 3, див. рис. 8).

Підтвердженням впливу ступеня закріплення абразивних частинок в ґрунті на зносостійкість робочих органів ґрунтообробних машин може слугувати відмінність інтенсивності зношування дискових робочих органів першого і другого ряду. В даному випадку всі характеристики середовища ґрунту будуть однакові окрім ступеня закріплення абразивних частинок. Після проходження першого ряду дискових робочих органів зменшується ступінь закріплення абразивних частинок, що і призводить до зменшення інтенсивності зношування на 17–35 % (див. рис. 8).

Збільшення вологості на глинистих ґрунтах підвищує значення коефіцієнта внутрішнього тертя та питомого зчеплення c . Такий процес буде тривати до перенасичення ґрунту вологою і появи вільної води, після чого коефіцієнт внутрішнього тертя та питоме зчеплення почнуть зменшуватися. Їхнє зменшення на піщаних і супіщаних ґрунтах також буде спостерігатися при перенасиченні

грунту вологою і появі вільної води, проте значення вологості, при яких можлива поява вільної води, там значно менші.

Для прогнозування довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин визначено коефіцієнт форми абразивних частинок ґрунтів України (табл. 3).

Таблиця 3

**Результати досліджень коефіцієнта форми K_f
абразивних частинок ґрунтів України**

Ґрунт	Розмір фракцій абразивних частинок, мм	Поверхня ґрунту	Глибина 200 мм	Глибина 400 мм	Глибина 600 мм	Глибина 800 мм
1. Лугові ґрунти, середньо-суглинковий	0–0,10	436,32	427,74	487,43	488,35	487,65
	0,10–0,25	328,75	336,97	381,43	379,17	386,24
	0,25–0,50	115,76	119,76	189,70	181,48	184,56
	0,50–0,75	105,72	109,50	227,46	216,79	218,72
	0,75–1,00	78,90	77,61	210,58	214,56	214,31
2. Дерново-підзолисті ґрунти, легко-суглинковий	0–0,10	239,68	227,89	269,76	271,62	271,73
	0,10–0,25	194,32	201,34	237,65	238,23	235,48
	0,25–0,50	112,69	109,86	175,47	181,53	174,97
	0,50–0,75	92,47	91,53	159,87	160,57	156,37
	0,75–1,00	81,83	83,29	144,83	143,75	146,79
3. Чорноземи неглибокі лісостепові, глина легка	0–0,10	294,38	289,56	346,67	351,92	338,16
	0,10–0,25	276,16	281,24	330,41	326,18	339,71
	0,25–0,50	128,94	122,63	179,01	180,69	175,61
	0,50–0,75	118,93	123,89	164,92	170,34	167,90
	0,75–1,00	89,79	94,31	153,79	160,31	154,39
4. Опідзолені ґрунти, середньо-суглинковий	0–0,10	346,79	336,82	418,23	429,47	428,81
	0,10–0,25	287,38	291,03	358,94	361,09	369,24
	0,25–0,50	165,34	158,45	201,76	193,21	196,34
	0,50–0,75	110,28	113,89	170,26	176,34	169,23
	0,75–1,00	100,29	96,49	156,29	164,42	158,37
5. Чорноземи звичайні на лісових породах, глина легка	0–0,10	274,56	269,23	299,57	292,31	295,34
	0,10–0,25	183,27	186,98	243,18	237,79	247,51
	0,25–0,50	164,29	160,37	220,34	218,51	222,57
	0,50–0,75	129,17	136,23	218,93	215,34	210,43
	0,75–1,00	98,18	96,59	182,54	176,21	189,35
6. Каштанові ґрунти, важко-суглинковий	0–0,10	369,56	367,89	406,57	409,87	400,29
	0,10–0,25	245,69	249,65	298,67	301,45	295,81
	0,25–0,50	145,87	142,87	201,31	210,19	205,79
	0,50–0,75	109,84	109,01	192,34	190,23	187,16
	0,75–1,00	91,75	94,51	176,79	180,45	177,10
7. Зразки взяті з лісового масиву, дерновопідзолисті ґрунти, легко-суглинковий	0–0,10	279,89	271,93	275,49	281,87	286,79
	0,10–0,25	248,63	239,58	242,65	249,67	249,95
	0,25–0,50	187,79	169,36	179,93	191,28	188,63
	0,50–0,75	162,46	166,91	161,47	169,47	162,74
	0,75–1,00	159,48	160,34	157,98	168,91	161,62

Можна стверджувати, що на глибині орного шару (проба з поверхні ґрунту та проба на глибині 200 мм) коефіцієнт форми абразивних частинок

для встановлених фракцій однаковий. Оскільки їхні значення відрізняються для ґрунту № 1 на 1,63–3,34 %, для ґрунту № 2 – на 1,01–4,91 %, для ґрунту № 3 – на 1,64–4,89 %, для ґрунту № 4 – на 1,25–4,16 %, для ґрунту № 5 – на 1,62–5,18 %, для ґрунту № 6 – на 0,45–2,92 %.

Для з'ясування впливу коефіцієнта форми абразивних частинок на інтенсивність зношування поверхонь робочих органів проведено лабораторні дослідження на сталях 65Г, 45 і 28MnB5. Як абразив використовували кварцовий пісок із трьох родовищ (Тарасівського, Ігнатпільського, Іршанського), звідки були відібрані частинки фракції 0,50–1,00 мм. В результаті досліджень встановлено, що збільшення коефіцієнта форми абразивних частинок призводить до зростання інтенсивності зношування матеріалу робочих органів ґрунтообробних машин.

Для врахування впливу складових ґрунтової маси на значення коефіцієнта тертя «матеріал робочого органу – середовище ґрунту» необхідно провести дослідження з визначення коефіцієнта тертя зі сталлю складових ґрунтової маси.

Коефіцієнт тертя ковзання по матеріалу робочих органів визначали для рослинних решток культур, які набули найбільшого розповсюдження в агропромисловому комплексі України (табл. 4).

Таблиця 4

Коефіцієнт тертя ковзання сухих рослинних решток по матеріалу робочого органу (шорсткість поверхні після полірування Ra=0,4, нерівності мають поперечний напрямок)

Рослинні рештки після збирання	Статичний коефіцієнт тертя	Динамічний коефіцієнт тертя
	Сталь 65Г	Сталь 65Г
Соя	0,62–0,71	0,37–0,48
Соя (плющена)	0,68–0,74	0,42–0,53
Пшениця	0,36–0,41	0,21–0,30
Ячмінь	0,44–0,53	0,32–0,37
Люцерна	0,62–0,86	0,44–0,60
Ріпак	0,48–0,57	0,40–0,47
Кукурудза	0,56–0,69	0,43–0,48
Соняшник	0,79–0,84	0,53–0,61
Сіно (лугова трава)	0,36–0,39	0,26–0,29

Такий великий діапазон коефіцієнтів тертя ковзання для кожної культури пояснюється різницею в значеннях коефіцієнтів тертя ковзання стебла та листя рослинних решток по сталі. У середньому коефіцієнт тертя ковзання листя на 18–29 % більший за коефіцієнт тертя ковзання стебел.

Коефіцієнти тертя ковзання рослинних решток по сталях 65Г та 45 істотно не відрізняються, а для сталі 28MnB5 у середньому він менше на 10–17 %. Зменшення коефіцієнта тертя ковзання сухих рослинних решток по сталі 28MnB5 пояснюється зменшенням міжмолекулярної взаємодії між рослинними рештками й поверхнею сталі. Зі свого боку це пов'язано зі складною обробкою (прокатування у двох перпендикулярних напрямках) листової сталі 28MnB5, яка імпортується в нашу країну.

Обробка матеріалу робочого органу ґрунтообробних машин, яка дає змогу зменшити поверхневу енергію (у нашому випадку об'ємне гартування сталі 65Г за температури 810–830 °С і середнього відпуску з дуже точною витримкою за температури 460–480 °С з подальшою дробоструминною обробкою (HRC 39-42)), призводить до зменшення коефіцієнта тертя на 5–16 %. Зменшення коефіцієнта тертя відбувається завдяки зниженню рівня міжмолекулярної взаємодії (адгезії) між рослинними рештками та сталлю.

Для визначення впливу шорсткості поверхні матеріалу робочого органу на статичний і динамічний коефіцієнт тертя було проведено відповідні дослідження. Унаслідок яких встановлено, що для полірованої поверхні коефіцієнт тертя ковзання значно більший, ніж для поверхонь, які мають чорнову обробку. Насамперед, це явище пояснюється більшою фактичною зоною контакту двох тіл, що призводить до збільшення сил міжмолекулярної взаємодії. Ця закономірність справедлива як для статичного, так і для динамічного коефіцієнтів тертя.

Зміна напрямку нерівностей на полірованій поверхні не призводить до збільшення статичного і динамічного коефіцієнтів тертя ковзання, а під час чорнової обробки при поздовжньому напрямку нерівностей статичний коефіцієнт залишається незмінним, а динамічний зменшується на 7–10 %.

У результаті проведених досліджень виявлено, що тертя, яке відбувається внаслідок взаємодії рослинних решток зі сталлю не можна описати законом Амонтона-Кулона, оскільки молекулярна складова суттєво впливає на величину коефіцієнту тертя «рослинні рештки – матеріал робочого органу». Процес тертя необхідно описувати молекулярно-механічною теорією тертя, запропонованою І. В. Крагельським. Коефіцієнт тертя твердої фази ґрунту визначали для різних типів ґрунтів з різною вологістю, матеріалів робочих органів та шорсткості (табл. 5).

Таблиця 5

**Коефіцієнт тертя «матеріал робочого органу – тверда фаза ґрунту»
(поперечний напрямок нерівностей)**

Ґрунт	Вологість, %	Матеріал	Шорсткість, R_a мкм	Статичний коефіцієнт тертя, f	Динамічний коефіцієнт тертя, f
Супіщаний	8,2	Сталь 65Г	0,4	0,44	0,31
			1,6	0,39	0,26
			6,3	0,35	0,23
		28MnB5	0,4	0,42	0,28
			1,6	0,38	0,26
			6,3	0,33	0,23
	8,8	Сталь 65Г	0,4	0,46	0,30
			1,6	0,42	0,28
			6,3	0,36	0,25
		28MnB5	0,4	0,42	0,28
			1,6	0,39	0,27
			6,3	0,35	0,24

Продовження таблиці 5

Ґрунт	Вологість, %	Матеріал	Шорсткість, R_a мкм	Статичний коефіцієнт тертя, f	Динамічний коефіцієнт тертя, f
Супіщаний	9,1	Сталь 65Г	0,4	0,48	0,32
			1,6	0,44	0,30
			6,3	0,42	0,29
		28MnB5	0,4	0,44	0,31
			1,6	0,41	0,29
			6,3	0,36	0,24
Середній суглинок	7,6	Сталь 65Г	0,4	0,67	0,46
			1,6	0,64	0,42
			6,3	0,63	0,41
		28MnB5	0,4	0,64	0,43
			1,6	0,62	0,40
			6,3	0,60	0,40
	9,7	Сталь 65Г	0,4	0,74	0,52
			1,6	0,71	0,49
			6,3	0,70	0,49
		28MnB5	0,4	0,72	0,48
			1,6	0,70	0,47
			6,3	0,67	0,44
	11,4	Сталь 65Г	0,4	0,78	0,52
			1,6	0,75	0,51
			6,3	0,74	0,49
28MnB5		0,4	0,78	0,51	
		1,6	0,73	0,48	
		6,3	0,71	0,46	
Глина легка	12,0	Сталь 65Г	0,4	0,79	0,55
			1,6	0,74	0,49
			6,3	0,73	0,48
		28MnB5	0,4	0,77	0,52
			1,6	0,72	0,50
			6,3	0,69	0,46
	13,2	Сталь 65Г	0,4	0,84	0,59
			1,6	0,82	0,54
			6,3	0,81	0,54
		28MnB5	0,4	0,82	0,57
			1,6	0,80	0,53
			6,3	0,78	0,52
	15,8	Сталь 65Г	0,4	0,89	0,58
			1,6	0,85	0,57
			6,3	0,84	0,56
28MnB5		0,4	0,88	0,58	
		1,6	0,84	0,56	
		6,3	0,84	0,55	

Як видно з результатів дослідження (табл. 5), статичний коефіцієнт тертя між матеріалом робочого органу та твердою фазою ґрунту в 1,41–1,52 рази

більший за динамічний. Таку закономірність необхідно обов'язково враховувати при проєктуванні робочих органів сільськогосподарських машин, які взаємодіють із середовищем ґрунту. Загалом спостерігається закономірність, за якою величина статичного та динамічного коефіцієнтів тертя для сталі 65Г порівняно зі сталлю 28MnV5 значно більша (як зазначалося вище, це зумовлено складною обробкою поверхні такої сталі, що викликає паціфікацію поверхневого шару та сприяє зменшенню сил міжмолекулярної взаємодії). Слід відзначити, що для глинистих ґрунтів різниця становить від 0 до 5,5 %, тоді як для середніх суглинків – від 0 до 4,8 %, для супіщаних – від 2,8 до 14,3 %.

Зменшення коефіцієнта тертя зі збільшенням шорсткості поверхні сталі пов'язане зі зменшенням міжмолекулярної взаємодії в зоні фрикційного контакту, що зі свого боку спричинено зменшенням площі фактичного контакту. Зміна напрямку нерівностей на полірованій поверхні, так само як і для коефіцієнта тертя між сталю та рослинними рештками, не призводить до збільшення статичного і динамічного коефіцієнтів тертя ковзання між сталю та твердою фазою ґрунту, а під час чорнової обробки при поздовжньому напрямку нерівностей статичний коефіцієнт залишається практично незмінним, а динамічний зменшується на 4–12 %.

Для визначення впливу динамічного коефіцієнта тертя на інтенсивність зношування поверхонь робочих органів ґрунтообробних машин було проведено лабораторні дослідження за вдосконаленим методом крильчатки. Динамічний коефіцієнт тертя визначали методом похилої площини (шорсткість поверхні становила R_a 1,6, напрямок нерівностей – поперечний). Зі збільшенням динамічного коефіцієнта тертя інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин зростає за лінійною залежністю (рис. 9). Наявність рослинних решток у середовищі ґрунту, з яким взаємодіють робочі органи ґрунтообробних машин під час експлуатації, може істотно змінювати як механізм, так і характер зношування, що зі свого боку призведе до зміни інтенсивності зношування. Для виявлення закономірностей впливу наявності рослинних решток та їхнього стану на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин здійснено лабораторні й експлуатаційні дослідження, результати яких представлено в табл. 6.

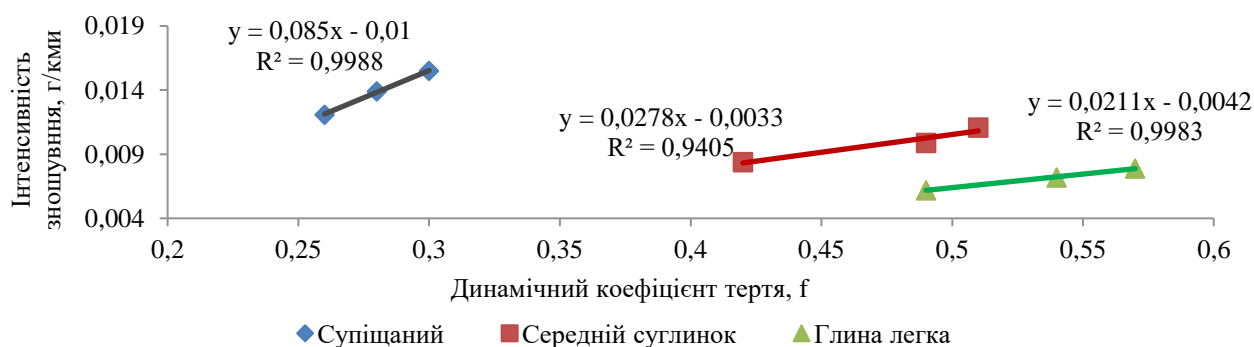


Рис. 9. Вплив динамічного коефіцієнта тертя на інтенсивність зношування матеріалу робочого органу (сталі 65Г піддавалася об'ємному загартуванню за температури 810–830 °С і середнього відпуску з дуже точною витримкою за температури 460–480 °С)

**Інтенсивність масового зношування зразків сталі 65Г
в абразивній масі ґрунту**

№	Абразивна маса	Уміст рослинних решток (% від маси)	Інтенсивність масового зношування, I_m г/км	№	Абразивна маса	Уміст рослинних решток (% від маси)	Інтенсивність масового зношування, I_m г/км
<i>Рослинні рештки після збирання сільськогосподарських культур (сухі)</i>							
1	Без рослинних решток	0	0,022	9	Соняшник	3	0,022
						6	0,023
2	Соя	3	0,022	10	Сіно (л. трава)	3	0,022
		6	0,023			6	0,021
3	Соя (плющена)	3	0,021	<i>Рослинні рештки після збирання сільськогосподарських культур (вологі)</i>			
		6	0,021				
4	Пшениця	3	0,022	11	Соя (вол. 38 %)	3	0,024
		6	0,021			6	0,024
5	Ячмінь	3	0,021	12	Ячмінь (вол. 34 %)	3	0,024
		6	0,022			6	0,025
6	Люцерна	3	0,022	<i>Рослини у різних фазах росту</i>			
		6	0,021				
7	Ріпак	3	0,021	13	Пшениця (у фазі колосіння)	3	0,026
		6	0,021			6	0,027
8	Кукурудза	3	0,023	14	Кукурудза (мол.-воск. стиглість)	3	0,028
		6	0,022			6	0,028

Як бачимо з табл. 6, у більшості сухих рослинних решток інтенсивність масового зношування зменшується на 4–5 %, що пояснюється зменшенням абразивності середовища завдяки наявності рослинних решток. А для кукурудзи, сої та соняшника, навпаки, характерне несуттєве підвищення інтенсивності зношування на 5–9 %. Для вологого матеріалу спостерігається збільшення інтенсивності зношування на 13,5–16 %, що можна пояснити виділенням амінокислот та амінів з рослинних решток, які призводять до інтенсифікації хімічних процесів на поверхні тертя. Це підтверджують і результати досліджень з абразивною масою, що у своєму складі мала рослини до збирання (у фазі колосіння для пшениці та в фазі молочно-воскової стиглості для кукурудзи). Зокрема, інтенсивність зношування для пшениці збільшилася на 15,4–18,6 %, а для кукурудзи – на 21,5 %. Рослини під час зношування виділяли соки (патоку), яка завдяки амінокислотам і амінам інтенсифікувала процес абразивного зношування.

Результати експлуатаційних досліджень підтверджують лабораторні дослідження, хоча лабораторні дослідження продемонстрували підвищення на 15,4–18,6 %, а експлуатаційні – на 8 %. Таке відхилення зумовлене з більш високою концентрацією рослинних решток кукурудзи в абразивній масі під час проведення лабораторних досліджень.

У п'ятому розділі «Вплив закономірностей зміни конструктивних та технологічних параметрів робочих органів ґрунтообробних машин на підвищення їх зносостійкості та довговічності» встановлено, що на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин у процесі взаємодії з ґрунтом відбувається утворення вторинних структур. Властивості цих структур визначають стійкість до абразивного зношування і залежать від особливостей матеріалу робочого органу, режимів та умов експлуатації.

У процесі експлуатації робочих органів дискових ґрунтообробних машин твердість поверхні суттєво змінюється. На різних типах ґрунтів закономірність зміни твердості має відмінний характер. З'ясовано, що для підвищення довговічності та зносостійкості серійних дискових робочих органів ґрунтообробних машин, які працюють в умовах нерозпушеного ґрунту (перший ряд, напівзакріплене абразивне середовище) на піщаних та супіщаних ґрунтах необхідно застосовувати робочі органи виготовлені зі сталі 65Г (оскільки вона здатна до самонаклепу внаслідок абразивного та ударно-абразивного зношування), а на глинистих і суглинкових – використовувати робочі органи виготовлені зі сталі 28MnB5. У дискових робочих органах ґрунтообробних машин, які працюють в умовах розпушеного ґрунту (другий ряд, взаємодія з «вільними» абразивними середовищами), спостерігається утворення вторинних структур на поверхні з меншою твердістю порівняно з початковою для всіх матеріалів та на всіх типах ґрунтів. У всіх типів лемішно-лапових робочих органів ґрунтообробних машин виявлено утворення вторинних структур з підвищеною твердістю незалежно від матеріалу робочих органів.

Визначено фізико-механічні та експлуатаційні властивості найбільш поширених матеріалів дискових робочих органів ґрунтообробних машин (сталь 28MnB5 та сталь 65Г). Установлено, що якісна борвмісна сталь 28MnB5 має кращі фізико-механічні та хімічні властивості порівняно зі сталлю 65Г. Незважаючи на кращі фізико-механічні та хімічні властивості сталі 28MnB5, робочі органи, виготовлені зі сталі 65Г, мають вищу довговічність та зносостійкість при експлуатації на супіщаних і піщаних ґрунтах, що пояснюється здатністю до «самонаклепу».

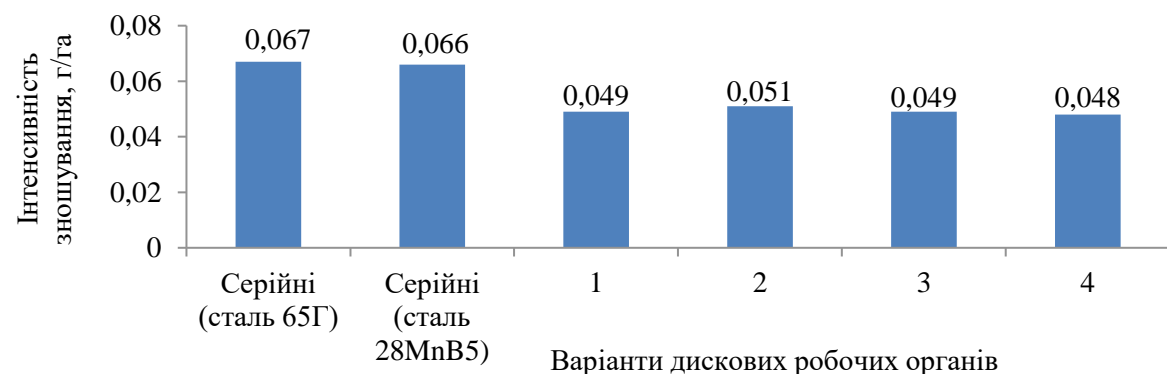
Для визначення впливу геометричної форми нанесення зносостійкого покриття на поверхню робочих органів дискових ґрунтообробних машин запропоновано різні технологічні варіанти (рис. 10). Нанесення зносостійкого покриття виконували на дискові робочі органи, виготовлені зі сталі 65Г.



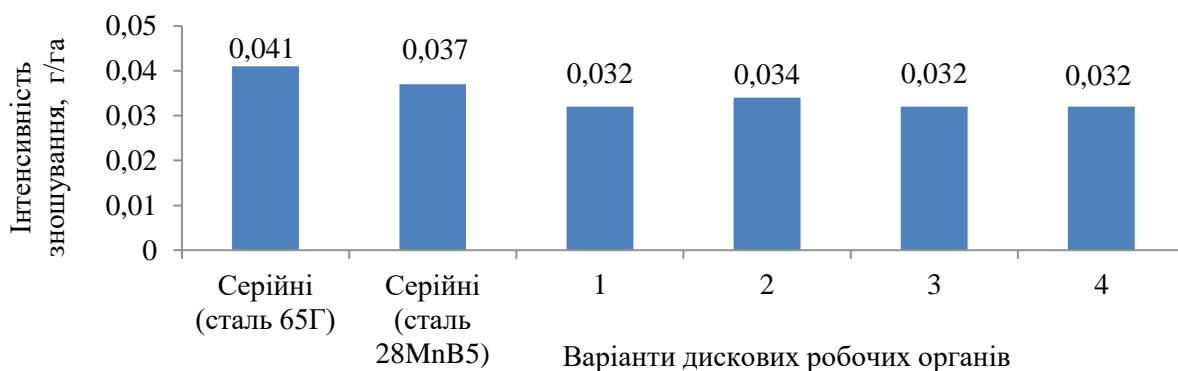
Рис. 10. Варіанти нанесення зносостійкого покриття на дискові робочі органи

З'ясовано, що геометрична форма нанесення зносостійкого покриття на поверхню тертя не має вирішального значення для підвищення зносостійкості дискових робочих органів ґрунтообробних машин на всіх типах ґрунтів. Відмінність полягає тільки в межах статистичної похибки (до 3 %).

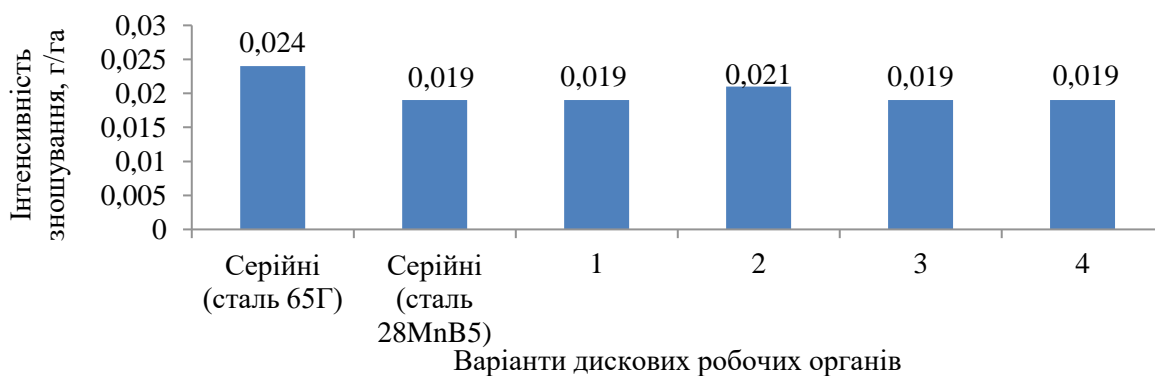
Зміцнення робочих органів виконували трьома видами електродів Т-620, Т-590 та М-Fe 6, результати досліджень представлено на рис. 11.



а) супіщаний ґрунт



б) середній суглинок



в) глина легка

Рис. 11. Інтенсивність зношування серійних та зміцнених (електродом Т-590) дискових робочих органів ґрунтообробних машин у процесі обробітку перших 500 га агрегатом УДА-4,5 поля після збирання кукурудзи на силос (варіанти нанесення зносостійкого покриття 1, 2, 3, 4 представлено на рис. 1)

Нанесення зносостійкого покриття на поверхню дискових робочих органів істотно підвищує зносостійкість на супіщаних і піщаних ґрунтах в порівняно із суглинками та глинистими ґрунтами (табл. 7). Так само це пояснюється

різними механізмами абразивного зношування поверхні: на піщаних і супіщаних ґрунтах переважає процес мікрорізання, а на інших типах ґрунтів – процес полідеформаційного руйнування поверхні металу.

Таблиця 7

**Підвищення зносостійкості дискових робочих органів
ґрунтообробних машин, виготовлених зі сталі 65Г**

Ґрунт	Марка електрода		
	T-620	T-590	M-Fe 6
Супіщаний	1,35–1,42	1,31–1,39	1,32–1,39
Середній суглинок	1,24–1,35	1,20–1,28	1,19–1,25
Глина легка	1,16–1,21	1,14–1,26	1,13–1,21

Використання дискових робочих органів, виготовлених з дорогої борвмісної сталі 28MnB5, дає суттєвий ефект підвищення зносостійкості тільки на глиняних і суглинкових ґрунтах. При експлуатації дискових ґрунтообробних машин на супіщаних і піщаних ґрунтах використання робочих органів, виготовлених зі сталі 28MnB5, не дає позитивного ефекту.

Унаслідок нанесення одношарового зносостійкого покриття довговічність дискових робочих органів підвищується на супіщаних ґрунтах в 1,28–1,41 раза, на суглинках в 1,11–1,24 раза та глинистих ґрунтах в 1,07–1,18 раза.

Зносостійкість стрілочастих лап культиваторів, виготовлених зі сталі 28MnB5, вища за зносостійкість стрілочастих лап, виготовлених зі сталі 65Г, на 18 % при експлуатації в умовах супіщаних ґрунтів, на 23 % – в умовах суглинкових ґрунтів і на 57 % – в умовах легкої глини. Нанесені захисні покриття істотно підвищують зносостійкість культиваторних лап, зокрема унаслідок нанесення шару електродом T-620 зносостійкість підвищується на 29–32 %, електродом T-590 – на 25–32 % і M-Fe 6 – на 15–29 % (рис. 12). При зносі зносостійкого покриття інтенсивність зношування була рівною інтенсивності зношування серійної стрілою лапи.

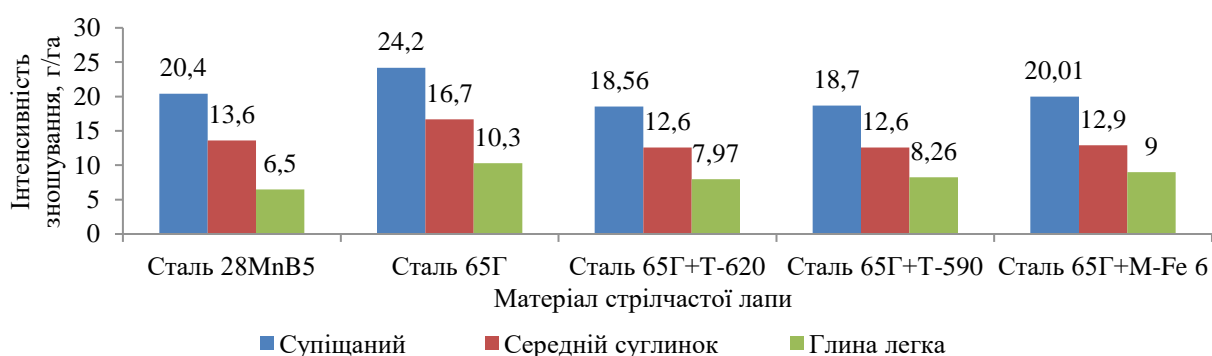


Рис. 12. Інтенсивність зношування стрілочастих лап культиватора (напрацювання на одну лапу 10 га)

Інтенсивність зношування стрілочастих лап у першому ряду на 14,5–21,2 % більша за інтенсивність зношування лап у другому ряду. Це зумовлено зменшенням ступеня закріплення абразивних частинок у результаті часткового розпушення шару ґрунту. Збільшення інтенсивності зношування на 24,2–38,4 % засвідчене у стрілочастих лап, які працюють по слідах мобільного енергетичного

засобу та сільськогосподарської машини. Усе це необхідно враховувати під час установки стрілочастих лап на культиватор для забезпечення рівності агрегату.

Унаслідок проведених випробувань обламування крил на інші механічні пошкодження спостерігали лише при експлуатації на супіщаних ґрунтах у всіх експериментальних зразках, крім стрілочастих лап, виготовлених зі сталі 28MnB5. Механічні пошкодження пов'язані з великою кількістю кам'янистих включень у ґрунті. Пошкоджені стрілочасті лапи не враховували в розрахунок їх довговічності (рис. 13).

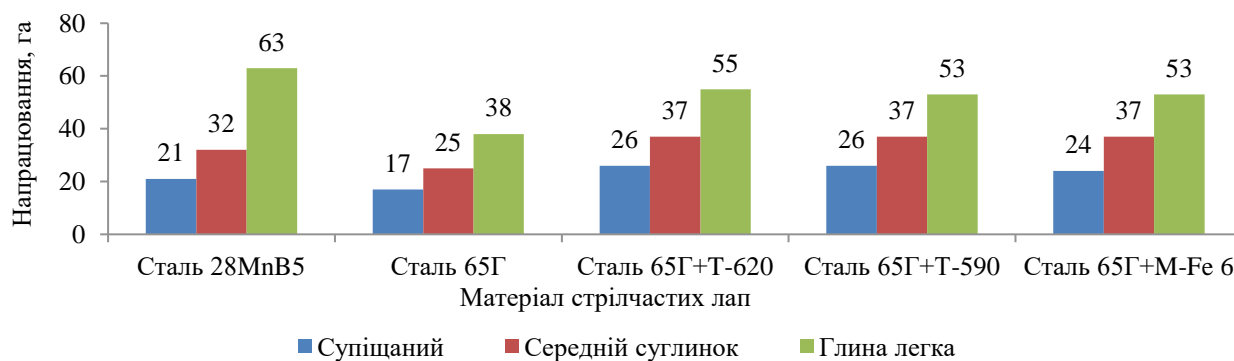


Рис. 13. Напрацювання до граничного стану стрілочастих лап

Використання стрілочасті лапи з високоякісної борвмісної сталі 28MnB5 дало змогу підвищити її довговічність до стрілочасті лапи зі сталі 65Г при експлуатації на супіщаних ґрунтах на 24 %, середньому суглинку – на 28 % і легкій глині – на 66 %.

Результати досліджень зносостійкості серійних і зміцнених лемішів представлено на рис. 14. Виявлено, що використання сталі Hardox 500 для виготовлення лемішно-лапових робочих органів ґрунтообробних машин більш ефективно при експлуатації на глиняних ґрунтах. Зносостійкість лемішів, виготовлених з такої сталі, вища за зносостійкість лемішів, виготовлених зі сталі 65Г, на 26 % при експлуатації в умовах супіщаного ґрунту, на 43 % – в умовах суглинкового ґрунту та на 82 % – в умовах легкої глини (рис. 14).

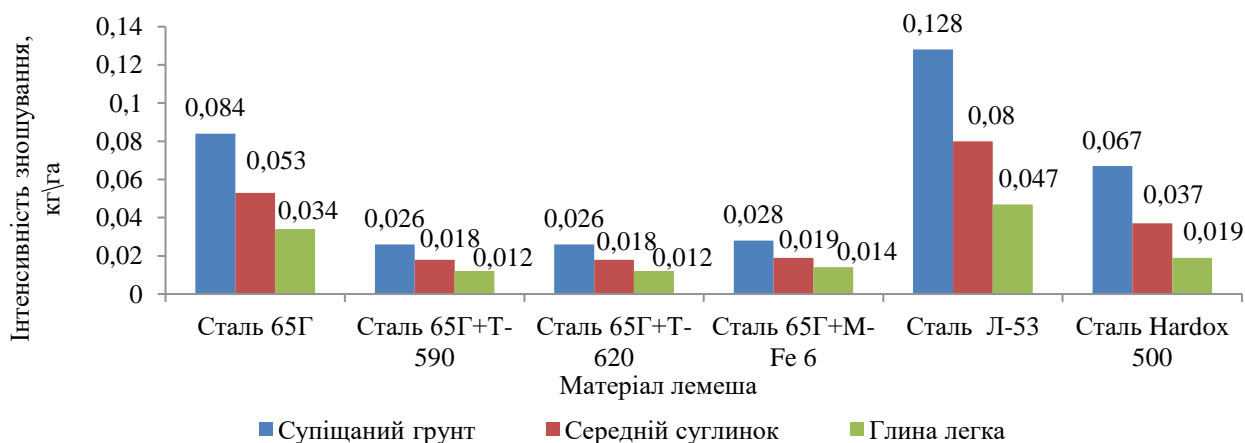


Рис. 14. Зносостійкість лемішів плуга ПЛН-3,35 (напрацювання на один леміш – 4 га)

Високу ефективність під час оранки супіщаних і суглинкових ґрунтів мають леміші зі зносостійким покриттям, нанесеним ручним дуговим наплавленням електродами Т-620 та Т-590 (табл. 8).

Таблиця 8

**Підвищення зносостійкості лемішів, виготовлених зі сталі 65Г
(плуг ПЛН-3-35, напрацювання на один леміш – 4 га)**

Ґрунт	Марка електроду		
	Т-620	Т-590	М-Fe 6
Супіщаний	3,20–3,33	3,21–3,32	2,95–3,07
Середній суглинок	2,85–2,87	2,84–2,85	2,64–2,71
Глина легка	2,77–2,82	2,78–2,83	2,41–2,50

Незважаючи на таке істотне підвищення зносостійкості лемішів, зміцнених дуговим наплавленням на початкових етапах експлуатації, довговічність їх підвищується не так суттєво (рис. 15). Насамперед, це пов'язано з інтенсифікацією абразивного зношування поверхні робочих органів після стирання зносостійкого покриття.

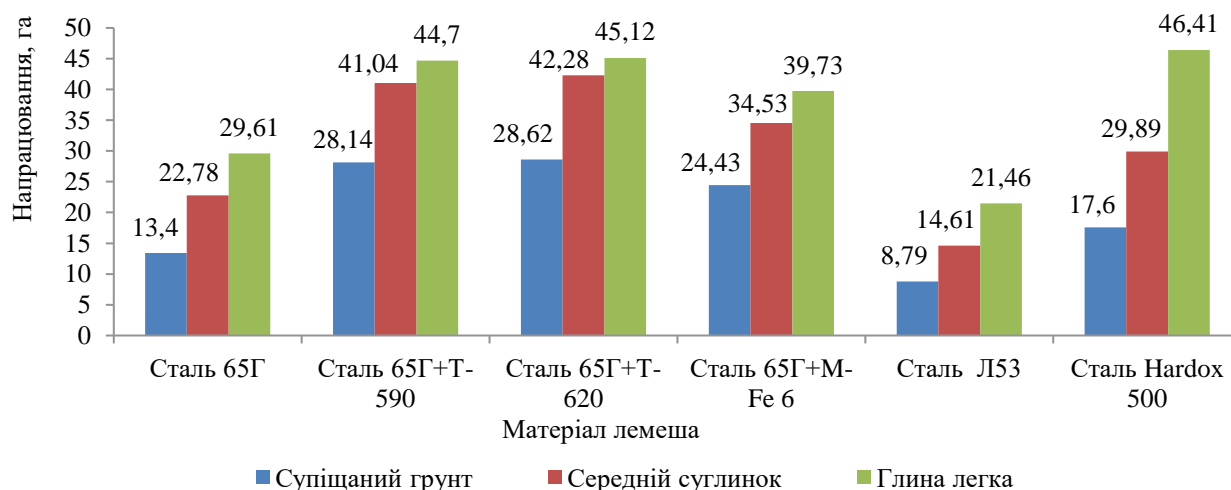


Рис. 15. Напрацювання до граничного стану лемішів плуга ПЛН-3,35

Використання серійних лемішів, виготовлених зі сталі Hardox 500, дає змогу підвищити довговічність порівняно із серійними лемішами зі сталі 65Г в 1,31–1,49 раза та у 2–2,14 раза порівняно з лемішами зі сталі Л53. Більш суттєве підвищення довговічності лемішів зі сталі Hardox 500 засвідчене при експлуатації на легкій глині порівняно з експлуатацією їх на супіщаних та суглинкових ґрунтах. Слід підкреслити, що довговічність лемішів, виготовлених зі сталі Hardox 500, вища за довговічність зміцнених лемішів під час роботи на глиняних ґрунтах, а на піщаних і супіщаних навпаки.

У шостому розділі «Розробка системи експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин для підвищення їх довговічності» на основі встановлених закономірностей зміни механізму та характеру зношування залежно від способу зберігання, умов і режимів експлуатації розроблено систему експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин, що дає змогу суттєво підвищити їх довговічність.

Установлено, що зміна вологості ґрунту та швидкості руху ґрунтообробного агрегату призводить не тільки до зміни інтенсивності зношування робочих органів ґрунтообробних машин, а й до зміни характеру зношування.

Збільшення вологості ґрунту на супіщаних та суглинкових ґрунтах призводить до підвищення інтенсивності зношування робочих органів ґрунтообробних машин. Отримані математичні залежності дають можливість з'ясувати значення вологості, при яких спостерігається найбільш інтенсивне абразивне зношування робочих органів, після чого інтенсивність зношування зменшується. Залежно від типу робочих органів вологість для супіщаних ґрунтів, при якій процес абразивного зношування протікає найінтенсивніше, становить 10–13 %, а для суглинкових – 9–13 %.

Для визначення впливу вологості ґрунту на характер зношування спостерігали за інтенсивністю зношування складових частин робочих органів ґрунтообробних машин. Зі зростанням вологості супіщаних ґрунтів інтенсифікується процес зношування носової частини леміша. На суглинкових та глиняних ґрунтах ця законність також наявна, але вона не так очевидно виражена.

Результати досліджень засвідчують, що зростання швидкості призводить до збільшення інтенсивності зношування робочих органів ґрунтообробних машин. Більш суттєве зростання інтенсивності зношування спостерігається при експлуатації робочих органів на ґрунтах з більшою зношувальною здатністю. Зі збільшенням швидкості зростає інтенсивність зношування носка леміша. Це явище пояснюється істотним зростанням питомого тиску в зоні контакту носової частини. Підвищення інтенсивності зношування різальних елементів при збільшенні швидкості можна спостерігати й на інших робочих органах ґрунтообробних машин (носок культиваторної лапи та лезова частина зуба диска).

За результатами проведених досліджень щодо впливу попередньої атмосферної корозії на зносостійкість сталей побудовано відповідно діаграми (рис. 16), де 1 – сталь 65Г (без термообробки); 2 – сталь 65Г з об'ємним гартуванням за температури 810–830 °С і середнім відпуском за температури 460–480 °С; 3 – сталь 65Г, зміцнена електроерозійною обробкою; 4 – сталь 65Г, зміцнена електродом Т-590; 5 – сталь 65Г з об'ємним гартуванням за температури 810–830 °С і середнім відпуском за температури 460–480 °С після абразивного зношування; 6 – сталь 65Г з об'ємним гартуванням за температури 810–830 °С і середнім відпуском за температури 460–480 °С з обробкою корміном; 7 – сталь 65Г з об'ємним гартуванням за температури 810–830 °С і середнім відпуском за температури 460–480 °С з обробкою технічним вазеліном УН; 8 – сталь 65Г з об'ємним гартуванням за температури 810–830 °С і середнім відпуском за температури 460–480 °С з обробкою оливою Shell Ensis Oil N; 9 – сталь 65Г з об'ємним гартуванням за температури 810–830 °С і середнім відпуском за температури 460–480 °С з обробкою відпрацьованою моторною оливою; 10 – сталь 28MnB5; 11 – сталь Л 53.

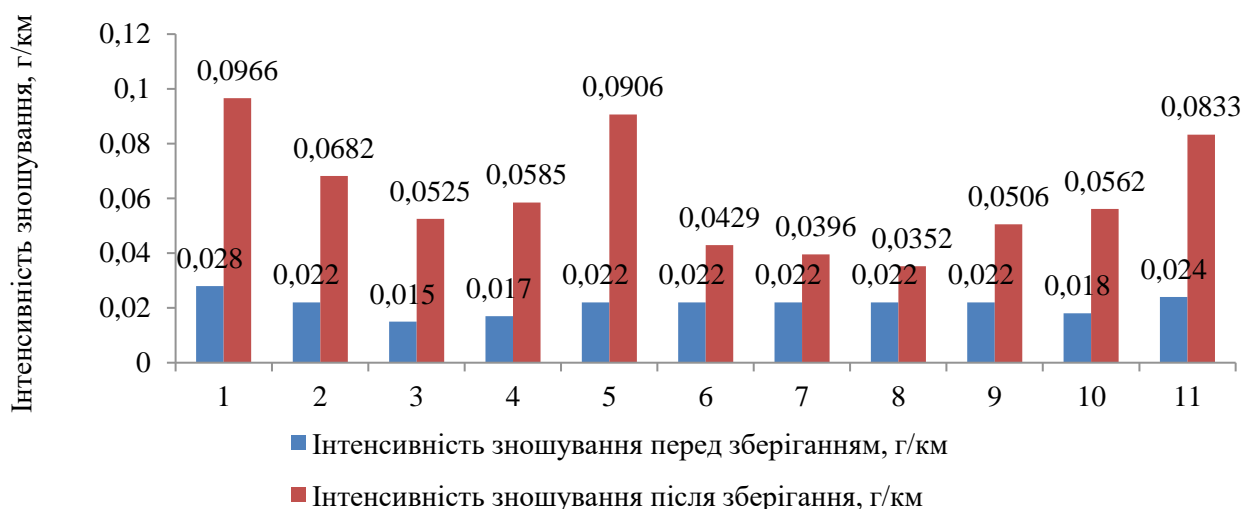


Рис. 16. Інтенсивність зношування зразків сталі, шлях тертя – 7488 м (умови зберігання: зона Лісостеп, під навісом з бетонним покриттям, висота розміщення зразків – 500 мм над поверхнею зберігання)

Унаслідок попередньої атмосферної корозії в зоні Лісостепу інтенсивність зношування сталей без нанесення захисного антикорозійного покриття зростає в 3,07–3,54 раза, при нанесенні захисного антикорозійного покриття – в 1,61–2,37 раза. Слід окремо виділити зразок після абразивного зношування, де інтенсивність зношування зросла в 4,12 раза. Для зони Полісся інтенсивність зношування зросла: для сталей без нанесення захисного антикорозійного покриття – у 3,21–4,15 раза; при нанесенні захисного антикорозійного покриття – в 1,82–2,73 раза; після абразивного зношування – в 5,26 раза. Для зони Степу інтенсивність зношування зросла: для сталей без нанесення захисного антикорозійного покриття – в 2,88–3,24 раза; при нанесенні захисного антикорозійного покриття – в 1,59–2,06 раза; після абразивного зношування – у 4 рази.

Науково обґрунтована система експлуатації ґрунтообробних машин з урахуванням ґрунтово-кліматичних умов дасть змогу суттєво підвищити зносостійкість і довговічність робочих органів. Розроблена система ґрунтується на відомих раніше даних та на особисто отриманих результатах унаслідок комплексно проведених теоретичних, лабораторних та експлуатаційних досліджень. Упровадження запропонованої системи (рис. 17) дає можливість кардинально по-новому поглянути на вирішення науково-прикладної проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. У роботі також розроблено комплексний підхід вирішення науково-прикладної проблеми підвищення довговічності та зносостійкості стрілочастих лап та лемешів.

Використання робочих органів, виготовлених з високоякісних сталей, не дає позитивного ефекту при експлуатації ґрунтообробних машин на ґрунтах, які мають високу зношувальну здатність. На таких ґрунтах слід застосовувати робочі органи з нанесеним зносостійким покриттям або зі змінними деталями. Вибір матеріалу зміцнення та способу нанесення покриття повинно базуватися

на економічній доцільності. У сьогоднішніх реаліях агропромислового комплексу України найбільш оптимальним способом є нанесення покриття ручним дуговим наплавленням покритим електродом.

Грунт		Матеріал робочого органу	Покращення об'ємних та поверхневих властивостей	Нанесення зносостійкого покриття	Геометричні параметри	
Глина	Важка	28MnB5	Заготовка прокатується у двох перпендикулярних напрямках, а диски підлягають складній термо- та дробоструминній обробці	Нанесення зносостійкого покриття не забезпечить суттєвого підвищення довговічності та зносостійкості.	R	Кут загострення
	Середня					
	Легка					
Суглинок	Важкий	Сталь 65Г 28MnB5	Об'ємне загартування за температури 810...830 °С і середнім відпуском із дуже точною витримкою за температури 460...480 °С (HRC 39-42)	Схема нанесення зносостійкого шару наведена на рис. 8. Зносостійкий шар повинен мати параметри відповідно до значень представлених у табл. 1 і табл. 2. Корекцію параметрів залежно від швидкості руху агрегату проводити за формулою 19.	Радіус кривини диска $R=(D/2)\sin e$	Внутрішній 10°-20°
	Середній					
	Легкий					
Супіщаний та піщаний	Важкий	Сталь 65Г	Об'ємне загартування за температури 810...830 °С і середнім відпуском із дуже точною витримкою за температури 460...480 °С (HRC 39-42)	Схема нанесення зносостійкого шару наведена на рис. 8. Зносостійкий шар повинен мати параметри відповідно до значень представлених у табл. 1 і табл. 2. Корекцію параметрів залежно від швидкості руху агрегату проводити за формулою 19.	Радіус кривини диска $R=(D/2)\sin e$	Зовнішній 10°-20°
	Супіщаний					
	Пісок зв'язаний					
Пісок вільний						

У разі наявності камінистих включень використовувати сталь 28MnB5

При змищенні загострення провадити бажано із довшою стороною (при технологічній неможливості з внутрішньої) кут загострення 28-34°

Грунт		Режими експлуатації				Спосіб зберігання
		Вол. ґрунту	Швидкість руху	Стан поживних решток	Стан ґрунту	
Глина	Важка	13...17 %	Збільшення швидкості призводить до підвищення інтенсивності зношування на всіх типах ґрунтів	Обробіток ґрунту слід проводити при якомога меншому вмісті патоки в поживних рештках. Для кожної сільськогосподарської культури існують оптимальні строки проведення обробітку ґрунту	Обробіток бажано проводити при найменшому ступені закріпленні абразивних частинок в ґрунті, що можливо досягнути при якомога ранішому повторному обробітку, оптимальній вологості та "відмирання" кореневої системи.	На відритому майданчику з бетонним покриттям або під навісом із бетонним покриттям із нанесенням консерваційних матеріалів (від поверхні майданчика до поверхні - не менше 100мм.).
	Середня					
	Легка					
Суглинок	Важкий	10...11 %	Збільшення швидкості призводить до підвищення інтенсивності зношування на всіх типах ґрунтів	Обробіток ґрунту слід проводити при якомога меншому вмісті патоки в поживних рештках. Для кожної сільськогосподарської культури існують оптимальні строки проведення обробітку ґрунту	Обробіток бажано проводити при найменшому ступені закріпленні абразивних частинок в ґрунті, що можливо досягнути при якомога ранішому повторному обробітку, оптимальній вологості та "відмирання" кореневої системи.	Під навісом із бетонним покриттям із нанесенням консерваційних матеріалів. Відстань від поверхні майданчика до поверхні - не менше 100мм.
	Середній					
	Легкий					
Супіщаний та піщаний	Важкий	9...10 %	Збільшення швидкості призводить до підвищення інтенсивності зношування на всіх типах ґрунтів	Обробіток ґрунту слід проводити при якомога меншому вмісті патоки в поживних рештках. Для кожної сільськогосподарської культури існують оптимальні строки проведення обробітку ґрунту	Обробіток бажано проводити при найменшому ступені закріпленні абразивних частинок в ґрунті, що можливо досягнути при якомога ранішому повторному обробітку, оптимальній вологості та "відмирання" кореневої системи.	Під навісом із бетонним покриттям із нанесенням консерваційних матеріалів. Відстань від поверхні майданчика до поверхні - не менше 100мм.
	Супіщаний					
	Пісок зв'язаний					
Пісок вільний		7...8 %				

Рис. 17. Комплексний підхід вирішення науково-прикладної проблеми підвищення довговічності та зносостійкості дискових робочих органів

Вибір режимів експлуатації ґрунтообробних агрегатів – це доволі складне та суперечливе питання. З одного боку, можуть бути агротехнічні строки та продуктивність агрегату загалом, з іншого – інтенсивність зношування робочих органів. Пошук раціональних режимів експлуатації повинен ґрунтуватися на економічних показниках і виробничій необхідності.

Спосіб зберігання робочих органів слід вибирати з реальних можливостей сільськогосподарських виробників. У більшості випадків у закритих ангарах і під навісами зберігається складна сільськогосподарська техніка (комбайни, сівалки тощо). Вибір місця зберігання для ґрунтообробної техніки здійснюється

за залишковим принципом. За неможливості зберігати всю ґрунтообробну техніку під навісом на відкритих майданчиках слід зберігати ґрунтообробні машини з робочими, органами виготовленими з високоякісних сталей, оскільки вони менше піддаються корозійним процесам.

Запропонований комплексний підхід можна легко адаптувати для інших типів робочих органів ґрунтообробних та посівних машин, які в процесі виконання технологічної операції взаємодіють із середовищем ґрунту.

У цьому розділі «Техніко-економічне обґрунтування запропонованого комплексного підходу адаптації зносостійкості» представлено результати виробничої перевірки й техніко-економічний аналіз комплексного підходу підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин.

Установлено, що зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин відповідно до розроблених схем і критеріїв, дає змогу 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 лемішів на 8–19 % та дискових робочих органів до 13 %. Самоорганізація зміцнених різальних елементів робочих органів призводить до зменшення витрат дизельного пального для дискових ґрунтообробних агрегатів у середньому приблизно на 10 %, для плугів – на 14 % та для культиваторів – на 11 % (рис. 18).

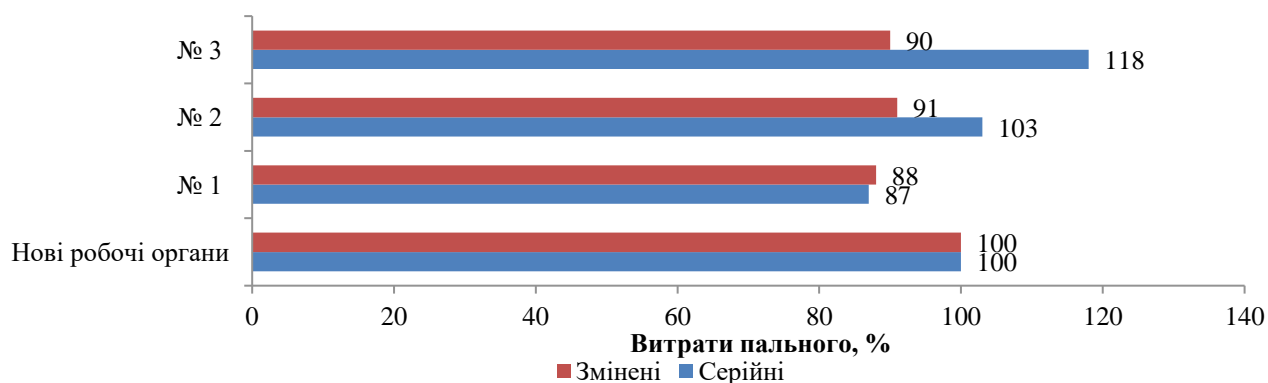


Рис. 18. Зміна витрат пального в початковій формі і при досягненні форми природного зношування (для серійних робочих органів виготовлених зі сталі 65Г) та процесу самозагострювання (для зміцнених робочих органів, виготовлених зі сталі 65Г та зміцнених електродом Т-620): № 1 – при експлуатації на супіщаних ґрунтах; № 2 – при експлуатації на суглинкових ґрунтах; № 3 – при експлуатації на легкій глині

Забезпечення рівності зношування робочих органів у процесі експлуатації ґрунтообробних машин оцінювали співвідношенням інтенсивності зношування різних ділянок (табл. 9): для дискових вирізних робочих органів – співвідношенням інтенсивності зношування зовнішнього і внутрішнього діаметрів; для стрілочастих лап – співвідношенням інтенсивності зношування носка та крила; для лемішів – співвідношенням інтенсивності зношування носка та леза.

**Рівностійкість зношування робочих органів у процесі експлуатації
грунтообробних машин (напрацювання дискових робочих органів – 60 га,
леміша – 4 га, стрілчастої лапи – 10 га)**

Робочий орган грунтообробних машин	Матеріал	Ґрунт		
		Супіщаний	Середній суглинок	Легка глина
Дисковий робочий орган	28MnB5	1,34	1,59	1,45
	65Г	1,31	1,67	1,87
	65Г+М-Fe 6	1,22	1,28	1,39
	65Г+Т-590	1,23	1,27	1,39
	65Г+Т-620	1,19	1,24	1,38
Стрілчаста лапа	28MnB5	1,18	1,98	2,06
	65Г	1,25	2,48	2,46
	65Г+М-Fe 6	1,16	1,74	1,96
	65Г+Т-590	1,18	1,69	1,81
	65Г+Т-620	1,14	1,66	1,82
Леміш	Hardox 500	1,47	2,18	2,19
	65Г	1,54	2,34	2,37
	Л53	1,56	2,30	2,39
	65Г+М-Fe 6	1,36	1,87	1,89
	65Г+Т-590	1,36	1,89	1,90
	65Г+Т-620	1,31	1,78	1,81

Застосування зміцнювальних матеріалів та несення їх за запропонованою схемою дає можливість суттєво покращити рівностійкість зношування робочих органів ґрунтообробних машин у процесі їхнього зношування та підвищити зносостійкість (в 1,13–3,33 раза) і довговічність робочих органів ґрунтообробних машин (в 1,07–2,14 раза).

Застосування комплексного підходу підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин дає змогу підвищити їх довговічність в 1,84–2,51 раза, та отримувати економічний ефект у межах 13–18% від вартості нової машини (протягом експлуатації одного комплексу робочих органів).

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. Розроблено методологію вирішення науково-прикладної проблеми підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин на основі адаптації їх зносостійкості з урахуванням ґрунтово-кліматичних умов та режимів експлуатації. Для її реалізації використано стандартні методи, методики та устаткування, а також розроблено особисто автором нові та вдосконалені.

3. Розроблено математичну модель підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх зносостійкості з урахуванням умов і режимів експлуатації. Побудовано структурно-логічну схему системи «робочий орган – ґрунт», що враховує сукупність процесів і явищ, які відбуваються в зоні фрикційного контакту при експлуатації ґрунтообробних машин. На основі виявлених закономірностей функціонування такої системи отримано рівняння енергетичного й масового балансу. Аналіз системи «робочий орган – ґрунт» визначив пріоритетні напрями вирішення науково-прикладної проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. Підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин обґрунтовано на основі молекулярно-механічної теорії тертя з отриманням рівняння динаміки зміни коефіцієнта тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин і ґрунтом з урахуванням усіх видів тертя, які наявні в зоні фрикційного контакту. З'ясовано, що величина коефіцієнта тертя між поверхнею робочих органів і ґрунтом залежить тільки від стану, у якому знаходиться система «робочий орган – ґрунт» і не залежить від того, як ця система прийшла в цей стан, саме тому даний процес необхідно описувати Марковським випадковим процесом. Для визначення ймовірнісних значень коефіцієнта тертя між робочим органом і ґрунтом побудована відповідна система рівнянь Колгоморова.

4. Теоретично й експериментально встановлено вплив ступеня закріплення абразивних частинок у ґрунті на механізм та характер зношування робочих органів ґрунтообробних машин. Виявлено, що з ростом ступеня закріплення абразивних частинок у ґрунті ймовірність виникнення процесів мікрорізання на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин зростає. На основі результатів досліджень виявлено закономірності процесу самоорганізації середовища ґрунту. Показано, що в процесі самоорганізації середовища ґрунту відбувається зростання його абразивних властивостей.

5. Теоретичні дослідження особливостей зношування робочих органів ґрунтообробних машин, з урахуванням ґрунтово-кліматичних умов та режимів експлуатації дозволили запропонувати критерії досягнення ефекту самозагострювання та рівностійкості зношування лемішно-лапових та дискових робочих органів.

6. 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.

7. Визначено коефіцієнт форми абразивних частинок найбільш типових ґрунтів України та його вплив на зносостійкість робочих органів ґрунтообробних машин. Установлено залежність коефіцієнта форми абразивних частинок ґрунту від типу ґрунту, глибини залягання та розміру абразивних частинок. Виявлено, що зменшення коефіцієнта тертя відбувається під час взаємодії з робочими органами ґрунтообробних машин. Це підтверджується відсутністю залежності зміни коефіцієнта форми абразивних частинок від глибини залягання в орному шарі та лабораторними дослідженнями. Для абразивних частинок розміром до 0,10 мм коефіцієнт форми абразивних частинок знаходиться в межах 227,89–488,35, для абразивних частинок розміром 0,1–0,25 мм – у межах 183,27–386,24, для абразивних частинок 0,25–0,5 мм – 109,86–222,57, для абразивних частинок 0,5–0,75 мм – 91,53–227,46, для абразивних частинок 0,75–1 мм – 78,90–214,56.

8. Виявлено вплив матеріалу робочих органів ґрунтообробних машин, його термічної обробки, шорсткості та напрямку нерівностей на динамічний та статичний коефіцієнт тертя між поверхнею робочих органів та складовими частинами середовища ґрунту. З'ясовано, що процес тертя між робочим органом і ґрунтом не може бути пояснений законом Амонтова-Кулона, такий процес доцільно описувати з позиції молекулярно-механічної теорії тертя. Зменшення сил міжмолекулярної взаємодії між складовими частинами ґрунту та поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин завдяки пацифікації поверхневого шару (складна обробка сталі) або зменшенню площі фактичного контакту (збільшення шорсткості поверхні) призводить до зменшення статичного та динамічного коефіцієнтів тертя. Зростання динамічного коефіцієнта тертя між поверхнею робочих органів і ґрунтом спричиняє пропорційне зростання інтенсивності зношування робочих органів, що необхідно враховувати під час конструювання робочих органів ґрунтообробних машин.

9. Установлено закономірність впливу наявності рослинних решток у середовищі ґрунту на зміну інтенсивності зношування робочих органів ґрунтообробних машин. Проведені лабораторні дослідження засвідчують, що наявність сухих рослинних решток, у межах від 3 до 6 % призводить до зменшення інтенсивності зношування на 4–5 %, наявність вологих рослинних решток призводить до зростання на 5–9 %, при наявності рослинних решток до збирання (фаза колосіння для пшениці або молочно-воскової стиглості для кукурудзи) призводить до зростання на 15,4–18,6 %. В експлуатаційних умовах наявність рослинних решток підвищує інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин (у межах 8 %).

10. Виявлені зміни властивостей поверхневих шарів, утворення вторинних структур у зоні фрикційного контакту та інтенсивності зношування робочих органів ґрунтообробних машин дали змогу встановити раціональні матеріали для виготовлення серійних лемішно-лапових та дискових робочих органів

грунтообробних машин з підвищеною довговічністю. Для дискових грунтообробних машин, які працюють в умовах піщаних та супіщаних ґрунтів, робочі органи слід виготовляти зі сталі 65 (сталь здатна до самонаклепу в процесі агресивного абразивного та ударно-абразивного зношування, спостережено підвищення початкової твердості на 15 %), а для умов глинистих і суглинкових ґрунтів – з борвмісної якісної сталі 28MnB5. Серійні лемішно-лапові робочі органи для всіх типів ґрунтів необхідно виготовляти з високоякісних зносостійких сталей, оскільки в умовах абразивного зношування вони проявляють здатність до підвищення твердості вторинних структур на поверхні тертя і мають вищу зносостійкість.

11. Установлено, що нанесення зносостійкого покриття дає можливість підвищити довговічність робочих органів грунтообробних машин: для зміцнених дискових робочих органів при експлуатації їх на супіщаних ґрунтах довговічність підвищується в 1,28–1,41 раза, на суглинках – в 1,11–1,24 раза та на глинистих ґрунтах – в 1,07–1,18 раза; для зміцнених стрілчастих лап при експлуатації їх на супіщаних ґрунтах довговічність підвищується в 1,41–1,53 раза, на суглинках – в 1,48 раза та на глинистих ґрунтах – в 1,39–1,44 раза; 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 грунтообробних машин більш ефективно на ґрунтах, які мають вищу зношувальну здатність (супіщані та піщані).

Виявлено закономірності впливу ґрунтово-кліматичних умов, режимів експлуатації та способів зберігання на довговічність і зносостійкість робочих органів грунтообробних машин. На основі експериментальних даних та теоретичних досліджень розроблено науково обґрунтовану систему експлуатації робочих органів грунтообробних машин.

12. Сформульовано основні принципи підвищення довговічності робочих органів грунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх зносостійкості з урахуванням ґрунтово-кліматичних умов та режимів експлуатації, які дозволяють підвищити довговічність робочих органів грунтообробних машин в 1,84–2,51 раза в залежності від типу робочих органів та ґрунтово-кліматичних умов. Економічна оцінка підвищення довговічності робочих органів грунтообробних 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України,

у тому числі включених до міжнародних наукометричних баз даних

1. Дворук В. І., Борак К. В. Методика дослідження впливу способу зберігання на абразивну зносостійкість робочих органів грунтообробних машин. Проблеми трибології. 2014. № 1. С. 14–18. (Здобувачем розроблено

методику дослідження впливу способу зберігання матеріалів робочих органів ґрунтообробних машин на стійкість до абразивного зношування).

2. Dvoruk V. I., **Borak K. V.**, Dobransky S. S. Effect of doping chromium structural steel at its abrasive wear resistance after heat treatment. Проблеми трибології. 2014. № 2. С. 24–28. (Здобувачем проаналізовано особливості абразивного зношування).

3. Дворук В. І., **Борак К. В.** Фізико-математичне моделювання трибосистеми «робочий орган – ґрунт». Проблеми трибології. 2015. № 3. С. 78–82. (Здобувачем розроблено фізико-математичну модель системи «робочий орган – ґрунт» та визначено особливості її функціонування).

4. Дворук В. І., **Борак К. В.**, Добранський С. С. Природа сил тертя та закономірності зносостійкості сталі при абразивному зношуванні. Проблеми трибології. 2015. № 4. С. 48–53. (Здобувачем проаналізовано закономірності зносостійкості сталі при абразивному зношуванні).

5. Дворук В. І., **Борак К. В.** Вплив абразивного зношування на атмосферну корозію робочих органів ґрунтообробних машин. Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів. 2016. Вип. 10/1 (29). С. 149–152. (Здобувачем визначено вплив зношування поверхні робочих органів на інтенсивність атмосферної корозії в процесі зберігання ґрунтообробних машин).

6. **Борак К. В.**, Руденко В. Г., Кравчук А. В., Добранський С. С. Фізичні, хімічні та механічні процеси в трибосистемі «робочий орган – ґрунт». Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2017. Вип. 181. С. 143–147. (Здобувачем визначено процеси, які відбуваються під час зношування робочих органів ґрунтообробних машин).

7. Дворук В. І., **Борак К. В.** Дослідження зносостійкості дискових робочих органів ґрунтообробних машин. Проблеми трибології. 2017. № 3. С. 100–105. (Здобувачем розроблено методику, проведено дослідження та здійснено обробку отриманих результатів).

8. Борак К. В. Методика визначення триботехнічних характеристик ґрунтового середовища. Біоресурси і природокористування. 2018. Т. 10. № 1–2. С. 135–144.

9. Борак К. В. Зміна поверхневої твердості робочих органів дискових ґрунтообробних машин у процесі експлуатації. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2019. Т. 30 (69). № 2. Ч. 1. С. 24–28.

10. Dvoruk V. I., **Borak K. V.** Research of the degree of fixation of abrasive particle in the soil. Проблеми трибології. 2019. № 1. С. 67–72. (Здобувачем розроблено методику, проведено дослідження, здійснено обробку отриманих результатів).

11. Дворук В. І., **Борак К. В.**, Добранський С. С., Герасимчук Д. В. Вплив попередньої корозії на інтенсивність зношування сталі. Вісник Причорномор'я. 2019. № 4. С. 106–113. (Здобувачем розроблено методику проведення

досліджень, проведено дослідження та здійснено обробку отриманих результатів).

12. Борак К. В. Фрикційна взаємодія ґрунту з поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. 2019. Vol. 10. No 4. P. 157–162.

13. Борак К. В. Зміна поверхневої твердості лемішно-лапових робочих органів ґрунтообробних машин в процесі експлуатації. *Біоресурси і природо-користування*. 2020. Т. 12. № 1–2. С. 90–96.

14. Borak K. V. Effect of plant remains on abrasive wear rate of the tilling machine movable operating parts. *Проблеми трибології*. 2020. № 1. С. 57–62.

15. Борак К. В. Прогнозування зміни абразивних властивостей ґрунтів для забезпечення надійної експлуатації робочих органів. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 53–64.

16. Борак К. В. Уплив коефіцієнта форми абразивних частинок ґрунту на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2020. № 1. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/591/558>.

17. Борак К. В. Вплив ступеня закріплення абразивної частинки на механізм зношування робочих органів ґрунтообробних машин. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. 2020. Vol. 11. No 2. P. 35–40.

18. **Борак К. В.**, Крук І. С. Вплив швидкості руху ґрунтообробних агрегатів на інтенсивність зношування робочих органів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки*. 2020. № 1. С. 30–36. *(Здобувачем розроблено методикау проведення досліджень, проведено дослідження та здійснено обробку отриманих результатів).*

19. Борак К. В. Наукові основи досягнення ефекту самозагострювання робочих органів ґрунтообробних машин. *Сільськогосподарські машини*. 2020. № 1. С. 18–40.

20. Борак К. В. Impact of soil moisture on wear intensity of the actuating elements of soil processing machines. *Проблеми трибології*. 2020. № 2. С 34–41.

Статті у наукових виданнях інших держав

21. Rogovskii I. L., **Borak K. V.**, Maksimovich E. Yu., Smelik V. A., Voinash S. A., Maksimovich K. Yu., Sokolova V. A. Wear resistance of blade and disc working bodies of tillage tilling machines hardened by electrodes T-series. *Journal of Physics*. 2020. Vol. 1679. 042084. *(Здобувачем запропоновано напрями вирішення наукової проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин, проведено та проаналізовано результати досліджень).*

22. **Борак К. В.**, Герук С. М., Крук І. С. Повышение долговечности стрельчатых лап паровых культиваторов. *Агропанарама*. 2020. № 2 (138). P. 10–14. *(Здобувачем розроблено методикау, проведено дослідження та здійснено обробку отриманих результатів).*

23. Borak K. Increasing the longevity and wear resistance of share-shelf operating devices of cultivating machines. *ТЕКА. An International Quarterly Journal*

on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering. 2020. Vol. 20. № 1. P. 41–48.

Стаття в іншому науковому виданні України

24. Дворук В. І., **Борак К. В.**, Руденко В. Г., Добранський С. С., Бучко І. І. Дослідження статичного та динамічного коефіцієнта тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин та рослинними рештками. Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2020. № 1 (83). URL: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Dopovid/article/view/13797> (Здобувачем розроблено методика, проведено дослідження та здійснено обробку отриманих результатів).

Патенти України на корисну модель

25. Бучко І. О., Дворук В. І., Руденко В. Г., **Борак К. В.**, Добранський С. С. Установа для дослідження зносостійкості матеріалів. Патент України на корисну модель № 142715 Україна, G01N 3/56. Заявник і патентовласник К. В. Борак. № u2019 11856; заявлено 12.12.2019; опубліковано 25.06.2020. Бюл. № 12/2020. (Здобувачем здійснено патентний пошук і запропоновано конструкцію установки).

26. Дворук В. І., **Борак К. В.**, Руденко В. Г., Герасимчук Д. В., Добранський С. С., Рябчук П. О., Бучко І. О. Спосіб дослідження матеріалів та покриттів на зносостійкість та визначення коефіцієнта тертя ковзання сталь – абразивна маса. Патент України на корисну модель № 142596 Україна, G01N 3/00. Заявник і патентовласник К. В. Борак. № u2019 02358; заявлено 11.03.2019; опубліковано 25.06.2020. Бюл. № 12/2020. (Здобувачем здійснено патентний пошук та запропоновано спосіб).

27. Бучко І. О., Дворук В. І., Руденко В. Г., **Борак К. В.**, Добранський С. С. Спосіб зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин. Патент України на корисну модель № 145951 Україна, C21D 1/00. Заявник і патентовласник К. В. Борак. № u2020 00720; заявлено 06.02.2020; опубліковано 13.01.2021. Бюл. № 2/2020. (Здобувачем здійснено патентний пошук та запропоновано спосіб).

Тези наукових доповідей

28. **Борак К. В.**, Герасимчук Д. В. Експлуатаційні способи підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. Підвищення надійності машин і обладнання: VII Всеукраїнська науково-практична конференція, м. Кіровоград, 16–18 квітня 2014 року: тези доповіді. Кіровоград, 2014. С. 77–78. (Здобувачем визначено експлуатаційні способи підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин).

29. Дворук В. І., **Борак К. В.**, Добранський С. С. Паспортизація робочих органів ґрунтообробних машин. Крамаровські читання: II Міжнародна науково-технічна конференція з нагоди 109-ї річниці від народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віце-президента УАСГН Крамарова Володимира Савовича, м. Київ, 17–18 лютого 2015 року: тези

доповіді. К., 2015. С. 53–54. *(Здобувачем запропоновано структуру паспорта робочих органів ґрунтообробних машин).*

30. Борак К. В. Перспективи застосування системного підходу для аналізу трибосистеми «робочий орган – ґрунт». Підвищення надійності машин і обладнання: ІХ Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених, м. Кіровоград 15–17 квітня 2015 року: тези доповіді. Кіровоград, 2015. С. 50–51.

31. **Борак К. В.**, Данильчук А. А. Перспективи використання способу вимірювання зносу робочих органів ґрунтообробних машин методом штучних баз. Перші наукові кроки – 2015: ІХ Всеукраїнська науково-практична конференція студентів та молодих науковців, м. Кам'янець-Подільський, 23–24 квітня 2015 року: тези доповіді. Кам'янець-Подільський, 2015. С. 39. *(Здобувачем запропоновано використання методу штучних баз для дослідження зносу робочих органів ґрунтообробних машин).*

32. Borak K. Physical and mathematical model tribosystem «working tool – land». Сучасні проблеми землеробської механіки: ХVІ Міжнародна наукова конференція, присвячена 115-річчю з дня народження Петра Мефодійовича Василенка, м. Київ, 17–19 жовтня 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 106–107.

33. Борак К. В. Вплив попередньої корозії в процесі зберігання на інтенсивність зношування робочих органів. Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки: Х Міжнародна науково-практична конференція, м. Кіровоград, 5–6 листопада 2015 року: тези доповіді. Кіровоград, 2015. С. 51–52.

34. Борак К. В. Вторинні структури на поверхні тертя робочих органів ґрунтообробних машин. Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій: ІІІ Міжнародна інтернет-конференція, м. Вінниця, 23 грудня 2015 року: тези доповіді. Вінниця, 2015. Ч. 1. С. 22.

35. Дворук В. І., **Борак К. В.** Вплив абразивного зношування на атмосферну корозію робочих органів ґрунтообробних машин. Сучасні проблеми землеробської механіки: ХVІ Міжнародна наукова конференція, м. Суми, 17–18 жовтня 2016 року: тези доповіді. Суми, 2016. С. 161–162. *(Здобувачем визначено вплив зношування поверхні робочих органів на інтенсивність атмосферної корозії в процесі зберігання ґрунтообробних машин).*

36. Дворук В. І., **Борак К. В.** Структурні зміни при функціонуванні трибосистеми «робочий орган – ґрунт». Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій: ІV Міжнародна інтернет-конференція, м. Вінниця, 11 листопада 2016 року: тези доповіді. Вінниця, 2016. С. 8–9. *(Здобувачем розроблено фізико-математичну модель системи «робочий орган – ґрунт» та визначено особливості її функціонування).*

37. Дворук В. І., **Борак К. В.**, Добранський С. С. Дифузійні процеси під час тертя. Аграрна наука та освіта Поділля: Міжнародна науково-практична конференція, м. Кам'янець-Подільський, 14–16 березня 2017 року: тези доповіді. Кам'янець-Подільський, 2017. Ч. 2. С. 27–28. *(Здобувачем розглянуто дифузійні процеси на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин під час взаємодії з ґрунтом).*

38. Дворук В. І., **Борак К. В.** Процеси в зоні фрикційного контакту трибосистеми «робочий орган – ґрунт». Науково-практична конференція викладачів, аспірантів та студентів Сумського національного аграрного університету, м. Суми, 19–21 квітня 2017 року: тези доповіді. Суми, 2017. С. 60. *(Здобувачем розроблено фізико-математичну модель системи «робочий орган – ґрунт» та визначено особливості її функціонування).*

39. Борак К. В. Утворення поверхневих плівок в зоні фрикційного контакту. Підвищення надійності машин і обладнання: XI Всеукраїнська наукова конференція студентів, аспірантів та молодих учених, м. Кропивницький, 20–21 квітня 2017 року: тези доповіді. Кропивницький, 2017. С. 12–13.

40. Дворук В. І., **Борак К. В.**, Когут О. В. Зміна властивостей поверхневого шару кристалічного тіла при взаємодії з ґрунтом. Рациональне використання енергії в техніці: XIII Міжнародна наукова конференція з нагоди 86-ї річниці від дня народження Момотенка Миколи Петровича, м. Київ, 17–19 травня 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 121–122. *(Здобувачем розглянуто зміни в поверхневому шарі робочих органів ґрунтообробних машин при взаємодії з ґрунтом).*

41. **Борак К. В.**, Добранський С. С. Вплив абразивного зношування на швидкість протікання атмосферної корозії. Інноваційні технології в АПК: Всеукраїнська науково-практична конференція, м. Луцьк, травень 2017 року: тези доповіді. Луцьк, 2017. С. 6–7. *(Здобувачем визначено вплив зношування поверхні робочих органів на інтенсивність атмосферної корозії в процесі зберігання ґрунтообробних машин).*

42. Борак К. В. Механізм та природа абразивного зношування робочих органів посівних та ґрунтообробних машин. Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки: XI Міжнародна науково-практична конференція, м. Кропивницький, 1–3 листопада 2017 року: тези доповіді. Кропивницький, 2017. С. 85–87.

43. Борак К. В. Методика визначення ступеня закріпленості абразивних частинок в ґрунті. Біоенергетичні системи в агропромисловому виробництві: I науково-практична конференція факультету інженерії та енергетики Житомирського національного агроєкологічного університету, м. Житомир, 16–17 листопада 2017 року: тези доповіді. Житомир, 2017. С. 63–65.

44. Дворук В. І., **Борак К. В.** Особливості руйнування поверхні матеріалів при зношуванні в ґрунтовому середовищі. Інноваційні розробки в аграрній сфері: Науково-практична конференція, м. Харків, 30 листопада 2017 року: тези доповіді. Х., 2017. С. 16. *(Здобувачем розглянуто етапи руйнування поверхні металу при абразивному зношуванні).*

45. **Борак К. В.**, Герук С. М., Руденко В. Г. Экспериментальные исследования почвообрабатывающих дисков фирмы Bellota. Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: Международная научно-практическая конференция, г. Минск, Республика Беларусь, 22–24 ноября 2017 года: тезисы доклада. Минск, 2017. С. 39–46. *(Здобувачем розроблено методику, проведено дослідження та здійснено обробку отриманих результатів).*

46. Дворук В. І., **Борак К. В.**, Марчук І. В. Класифікація абразивного зношування. Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій: V Міжнародна інтернет-конференція, м. Вінниця, 1–2 грудня 2017 року: тези доповіді. Вінниця, 2017. Ч. 1. С. 20–21. *(Здобувачем проведено аналіз класифікації абразивного зношування).*

47. Борак К. В. Визначення ступеня закріпленості абразивних частинок в ґрунті. Крамаровські читання: V Міжнародна науково-технічна конференція з нагоди 111-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віце-президента УАСГН Крамарова Володимира Савовича, м. Київ, 22–23 лютого 2018 року: тези доповіді. К., 2018. С. 93–96.

48. Дворук В. І., **Борак К. В.** Механізм та природа абразивного зношування робочих органів посівних та ґрунтообробних машин. Крамаровські читання: V Міжнародна науково-технічна конференція з нагоди 111-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віце-президента УАСГН Крамарова Володимира Савовича, м. Київ, 22–23 лютого 2018 року: тези доповіді. К., 2018. С. 57–60. *(Здобувачем проаналізовано механізм та природу абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин).*

49. Дворук В. І., **Борак К. В.** Методика визначення коефіцієнта форми абразивних частинок ґрунту. Аграрна наука та освіта в умовах євроінтеграції: Міжнародна науково-практична конференція, м. Кам'янець-Подільський, 20–22 березня 2018 року: тези доповіді. Кам'янець-Подільський, 2018. Ч. 2. С. 119–120. *(Здобувачем розроблено методику визначення коефіцієнта форми абразивних частинок ґрунтів).*

50. Дворук В. І., **Борак К. В.** Методика визначення триботехнічних характеристик ґрунтового середовища. Підвищення надійності машин і обладнання: XII Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих науковців, м. Кропивницький, 18–20 квітня 2018 року: тези доповіді. Кропивницький, 2018. С. 151–153. *(Здобувачем розроблено методику визначення триботехнічних характеристик ґрунтів).*

51. Дворук В. І., **Борак К. В.** Напрямки підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних та посівних машин. Цілі сталого розвитку третього тисячоліття: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 23–25 травня 2018 року: тези доповіді. К., 2018. Т. 5. С. 147–148. *(Здобувачем визначено напрями вирішення наукової проблеми підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин).*

52. Дворук В. І., **Борак К. В.** Аналіз моделей ґрунту, як елемента трибосистеми «робочий орган – ґрунт». Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій: VI Міжнародна конференція, м. Вінниця, 13–15 вересня 2018 року: тези доповіді. Вінниця, 2018. Ч. 1. С. 25–26. *(Здобувачем проведено аналіз існуючих моделей ґрунту).*

53. Борак К. В. Вплив розміру абразиву на інтенсивність зношування. Крамаровські читання: VI Міжнародна науково-технічна конференція з нагоди 112-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-

кореспондента ВАСГНІЛ, віце-президента УАСГН Крамарова Володимира Савовича, м. Київ, 21–22 лютого 2019 року: тези доповіді. К., 2019. С. 268–272.

54. Дворук В. І., **Борак К. В.** Забезпеченість ґрунтообробною та посівною технікою агропромислового комплексу України. Молодь і технічний прогрес в АПК: Міжнародна науково-практична конференція, м. Харків, 4 квітня 2019 року: тези доповіді. Х., 2019. Т. 2. С. 122–123. (*Здобувачем визначено забезпеченість ґрунтообробною та посівною технікою агропромислового комплексу України*).

55. Дворук В. І., **Борак К. В.** Методи підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів посівних та ґрунтообробних машин. Підвищення надійності машин і обладнання: I Міжнародна науково-практична конференція, м. Кропивницький, 17–19 квітня 2019 року: тези доповіді. Кропивницький, 2019. С. 64–65. (*Здобувачем запропоновано напрями вирішення наукової проблеми підвищення довговічності зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин*).

56. Борак К. В. Технологічні методи підвищення довговічності та зносостійкості. Імпортозамінні технології вирощування, зберігання і переробки продукції садівництва та рослинництва: V Міжнародна науково-практична конференція, м. Умань, 23–24 травня 2019 року: тези доповіді. Умань, 2019. С. 113–115.

57. Дворук В. І., **Борак К. В.**, Добранський С. С., Герасимчук Д. В. Вплив попередньої корозії на інтенсивність зношування сталі. Сучасні проблеми землеробської механіки: XX Міжнародна наукова конференція, присвячена 119-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, м. Миколаїв, 17–19 жовтня 2019 року: тези доповіді. Миколаїв, 2019. С. 28–30. (*Здобувачем визначено вплив попередньої корозії робочих органів ґрунтообробних машин в процесі зберігання на інтенсивність зношування*).

58. Борак К. В. Визначення впливу вологості та рослинних решток на значення коефіцієнта внутрішнього тертя ґрунту та питомого зчеплення абразивних частинок. Крамаровські читання: VII Міжнародна науково-технічна конференція з нагоди 113-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віце-президента УАСГН Крамарова Володимира Савовича, м. Київ, 20–21 лютого 2020 року: тези доповіді. К., 2020. С. 42–45.

АНОТАЦІЯ

Борак К. В. Комплексний підхід підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальністю 05.05.11 «Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2021.

Дисертацію присвячено розробленню 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.

На основі молекулярно-механічної теорії тертя отримано рівняння для визначення коефіцієнта тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин і ґрунтом, зважаючи на всі види тертя, наявні в зоні фрикційного контакту. Теоретично та експериментально встановлено вплив ступеня закріплення абразивних частинок у ґрунті на механізм і характер зношування робочих органів ґрунтообробних машин.

Визначено коефіцієнт форми абразивних частинок ґрунтів України та його вплив на зносостійкість та довговічність робочих органів ґрунтообробних машин.

На основі експериментальних досліджень установлено вплив матеріалу робочих органів ґрунтообробних машин, його термічної обробки, шорсткості та напрямку нерівностей на динамічний і статичний коефіцієнти тертя між поверхнею робочих органів та складовими частинами середовища ґрунту. Доведено, що процес тертя між робочим органом і ґрунтом не може бути пояснений законом Амонтова-Кулона, а такий процес доцільно описувати з позиції молекулярно-механічної теорії тертя. Описано закономірність впливу наявності рослинних решток у середовищі ґрунту на зміну інтенсивності зношування робочих органів ґрунтообробних машин.

Експериментальні дослідження зміни властивостей поверхневих шарів, утворення вторинних структур у зоні фрикційного контакту та інтенсивності зношування робочих органів ґрунтообробних машин дали змогу встановити раціональні матеріали для виготовлення серійних лемішно-лапових та дискових робочих органів ґрунтообробних машин з підвищеною довговічністю. Визначено, що нанесення зносостійкого покриття суттєво підвищує довговічність (в 1,07–2,14 раза) та зносостійкість (в 1,13–3,13 раза) робочих органів ґрунтообробних машин.

Сформульовано основні принципи підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх зносостійкості, які дають можливість підвищити довговічність робочих органів ґрунтообробних машин в 1,84–2,51 раза залежно 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 і режимів експлуатації показала економію затрат у межах 6–18 % від вартості нової машини протягом експлуатації одного комплексу робочих органів.

Ключові слова: ґрунт, ґрунтообробна машина, довговічність, зносостійкість, надійність, комплексний підхід, леміш, стрілчаста лапа, дисковий робочий орган.

АННОТАЦИЯ

Борак К. В. Комплексный подход повышение долговечности и износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих машин. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.05.11 «Машины и средства механизации сельскохозяйственного производства». Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Киев, 2021.

Диссертация посвящена разработке комплексного подхода повышения долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин с учетом закономерностей влияния почвенно-климатических условий, конструктивных и технологических параметров, режимов эксплуатации, а также условий хранения.

Разработана математическая модель повышения долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин комплексным подходом адаптации их износостойкости с учетом условий и режимов эксплуатации. На основе молекулярно-механической теории трения получено уравнение для определения коэффициента трения между поверхностью рабочих органов почвообрабатывающих машин и почвой с учетом всех видов трения, имеющиеся в зоне фрикционного контакта. Теоретически и экспериментально установлено влияние степени закрепления абразивных частиц в почве на механизм и характер износа рабочих органов почвообрабатывающих машин.

Определены коэффициенты формы абразивных частиц почв Украины и его влияние на износостойкость и долговечность рабочих органов почвообрабатывающих машин. На основе результатов лабораторных и эксплуатационных исследований выявлены закономерности процесса самоорганизации среды почвы. Показано, что в процессе самоорганизации среды почвы происходит рост её абразивных свойств.

На основе экспериментальных исследований установлено влияние материала рабочих органов почвообрабатывающих машин, его термической обработки, шероховатости и направления неровностей на динамический и статический коэффициент трения между поверхностью рабочих органов и составными частями почвенной среды. Доказано, что процесс трения между рабочим органом и грунтом не может быть объяснен законом Амонтова-Кулона, а данный процесс целесообразно описывать с позиции молекулярно-механической теории трения. Установлена закономерность влияния наличия растительных остатков в почве на изменение интенсивности износа рабочих органов почвообрабатывающих машин.

Экспериментальные исследования изменения свойств поверхностных слоев, образование вторичных структур в зоне фрикционного контакта и интенсивности износа рабочих органов почвообрабатывающих машин позволили установить рациональные материалы для изготовления серийных лемешно-лаповых и дисковых рабочих органов почвообрабатывающих машин с повышенной долговечностью. Установлено, что нанесение износостойкого

покрытия позволяет существенно повысить долговечность (в 1,07–2,14 раза) и износостойкость (в 1,13–3,13 раза) рабочих органов почвообрабатывающих машин.

Выявлены закономерности влияния почвенно-климатических условий, режимов эксплуатации и способов хранения на долговечность и износостойкость рабочих органов почвообрабатывающих машин. На основе экспериментальных данных и теоретических исследований разработано научно-обоснованную систему эксплуатации рабочих органов почвообрабатывающих машин.

Сформулированы основные принципы повышения долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин комплексным подходом адаптации их износостойкости, которые позволяют повысить долговечность рабочих органов почвообрабатывающих машин в 1,84–2,51 раза в зависимости от типа рабочих органов и почвенно-климатических условий.

Экономическая оценка повышения долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин комплексным подходом адаптации их износостойкости с учетом почвенно-климатических условий и режимов эксплуатации показала экономию затрат в пределах 6–18 % от стоимости новой машины в течение эксплуатации одного комплекта рабочих органов.

Ключевые слова: почва, почвообрабатывающая машина, долговечность, износостойкость, надежность, комплексный подход, лемех, стрельчатая лапа, дисковый рабочий орган.

ANNOTATION

Borak K. V. Integrated Approach to Service Durability and Wear Resistance Enhancement of the Working Tools of Tillage Machines. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.05.11 «Machines and Means of Agricultural Production Mechanization». National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, 2021.

The thesis is devoted to the development of scientific foundations for increasing the durability of the tillage machine working tools, taking into account the regularities of the influence of soil and climatic conditions, design and technological parameters, operating modes, as well as storage conditions.

Basing on the molecular-mechanical theory of friction, an equation has been obtained for determining the coefficient of friction between the surface of the tillage working tools and soil, considering all types of friction available in the tribological contact zone. The influence of the degree of abrasive particle fixation in the soil on the mechanism and the character of wearing of the tillage machine working tools has been theoretically and experimentally established.

The coefficients of the abrasive particles shape of soils of Ukraine and its effect on the wear resistance and durability of the tillage working tools have been determined.

On the basis of experimental studies, the influence of the tillage machine working tools material, its thermal treatment, roughness, and direction of irregularities on the dynamic and static coefficient of friction between the tillage tools surface

and the soil substrate components has been established. It has been proved that the process of friction between the tillage tool and the soil may not be explained by Amontov-Coulomb's law, and it is expedient to describe this process from the standpoint of the molecular-mechanical theory of friction. The regularity of the influence of the plant residues presence in the soil substrate on the change of the intensity of the wearing of tillage machine working tools is established.

Experimental studies of change in the surface layer properties, the formation of secondary structures in the tribological contact zone, and the intensity of the wearing of tillage machine working tools enabled defining rational materials for the production of serial V-shaped ploughshares and disk working tools of tillage machines with increased durability. It has been established that the application of a wear-resistant coating can significantly enhance the durability (by 1.07–2.14 times) and wear resistance (by 1.13–3.13 times) of the tillage machine working tools.

The basic principles of enhancement of service durability of tillage working tools through the integrated approach of adaptation of their wear resistance have been formulated, which allow to enhance the durability of tillage machine work tools in 1.84–2.51 times depending on the type of tillage working tool and soil and climatic conditions.

An economic evaluation of the enhancement of durability of the tillage machine working tools through the integrated approach to adapting their wear resistance with taking into account soil and climatic conditions and operation modes demonstrated cost saving in the range of 6–18 % of a cost of a new machine within the term of exploitation of one set of tillage working tools.

Key words: soil, tillage machine, service durability, wear resistance, reliability, integrated approach, ploughshare, V-shaped ploughshare, disk working tool of tillage machine.

Підписано до друку 24.03.21
Ум. друк. арк. 3,1
Наклад 100 прим.

Формат 60x84\16
Зам. № 210155

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі НУБіП України
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041
тел.: 527-81-55

