

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

**Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу**

**Кваліфікаційна робота
на правах рукопису**

КОВАЛЬЧУК ДАНІЛ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 631.3:621.891:620.178

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ
РОБОЧИХ ОРГАНІВ ҐРУНТООБРОБНИХ
МАШИН**

208 “Агроінженерія”

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

Керівник роботи
Савченко В.М.
кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Ковальчук Даніл Сергійович. Підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

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

На підставі аналізу конструктивних особливостей і умов експлуатації дискових робочих органів встановлено, що процес їх спрацювання є багатофакторним і формується під одночасною дією абразивного ґрунтового середовища, ударних навантажень та змінних, зокрема коливальних, рухів під час виконання технологічних операцій з обробітку ґрунту.

У ході досліджень проаналізовано триботехнічні властивості наплавлених шарів, сформованих методом ручного електродугового наплавлення. Отримані результати показали, що використання зносостійких покриттів на основі електродних матеріалів забезпечує істотне підвищення твердості поверхневого шару та супроводжується зменшенням інтенсивності масового зношування.

Результати польових експериментальних випробувань дисків із наплавленими покриттями підтвердили ефективність застосування ручного електродугового наплавлення як засобу підвищення їх експлуатаційного ресурсу. В умовах реальної роботи зафіксовано зростання довговічності робочих органів порівняно із серійними зразками в межах 48...75 %.

Під час експлуатаційних досліджень також встановлено стабільну реалізацію ефекту самозагострювання. Сформовані наплавлені шари сприяють керованому спрацюванню менш твердих зон основного матеріалу з одночасним збереженням виступів зміцненого шару, що дає змогу підтримувати зменшений кут загострення ріжучої кромки протягом усього строку служби диска. Це, у свою чергу, призводить до зниження тягового опору агрегату та скорочення витрат пального під час обробітку ґрунту. Порівняльний аналіз серійних і наплавлених робочих органів показав, що впроваджені технологічні рішення дозволили зменшити кут загострення ріжучих крайок дисків до 13 % упродовж експлуатаційного періоду.

Ключові слова: зносостійкість, дискові робочі органи, твердість, ґрунт, електродугового наплавлення.

ANNOTATION

Kovalchuk Danil Serhiiovych. Improving the wear resistance of working bodies of tillage machines. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

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

Based on the analysis of the design features and operating conditions of disc working bodies, it was established that their wear process is multifactorial and is formed under the simultaneous influence of an abrasive soil environment, impact loads, and variable, including oscillatory, motions during the performance of soil tillage operations.

During the study, the tribotechnical properties of deposited layers formed by manual electric arc surfacing were analyzed. The obtained results showed that the use of wear-resistant coatings based on electrode materials provides a significant increase in the hardness of the surface layer and is accompanied by a reduction in the intensity of mass wear.

The results of field experimental tests of discs with deposited coatings confirmed the effectiveness of manual electric arc surfacing as a means of increasing their service life. Under real operating conditions, an increase in the durability of the working bodies compared to standard serial samples in the range of 48–75% was recorded.

During operational studies, a stable realization of the self-sharpening effect was also established. The formed deposited layers promote controlled wear of the less hard zones of the base material while preserving the protrusions of the strengthened layer, which makes it possible to maintain a reduced cutting-edge angle throughout the entire service life of the disc. This, in turn, leads to a reduction in the draft resistance of the implement and a decrease in fuel consumption during soil tillage. A comparative analysis of standard and surfaced working bodies showed that the implemented technological solutions made it possible to reduce the sharpening angle of disc cutting edges by up to 13% during the operating period.

Keywords: wear resistance, disc working bodies, hardness, soil, electric arc surfacing.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ.....	9
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	45
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЛАБОРАТОРНИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	49
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	59

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасний розвиток агропромислового комплексу України характеризується зростанням інтенсивності використання сільськогосподарської техніки, підвищенням вимог до якості виконання технологічних операцій та необхідністю зниження витрат на експлуатацію машинно-тракторного парку. Однією з найбільш ресурсоемних і відповідальних груп машин у землеробстві є ґрунтообробні агрегати, робочі органи яких функціонують в умовах інтенсивного абразивного, ударного та корозійно-механічного зношування. Саме зношування робочих органів зумовлює зниження агротехнічних показників обробітку ґрунту, зростання енергетичних витрат, погіршення якості підрізання та кришіння ґрунту, а також призводить до передчасного виходу машин з експлуатації.

В умовах воєнного стану та обмежених фінансових ресурсів особливої актуальності набуває завдання продовження строку служби наявної сільськогосподарської техніки, зменшення залежності від імпортних запасних частин і скорочення витрат на їх заміну. Значна частина ґрунтообробних машин, що експлуатуються в господарствах України, має високий ступінь зношеності, а оновлення парку здійснюється повільними темпами. За таких умов підвищення зносостійкості робочих органів шляхом удосконалення матеріалів, конструктивних рішень і технологій зміцнення є одним із найбільш ефективних шляхів підвищення надійності та економічної ефективності машин.

Особливе значення проблема зношування набуває з урахуванням різноманітності ґрунтово-кліматичних умов України, зокрема високої абразивності ґрунтів Полісся, Лісостепу та Степу, наявності піщаних і супіщаних фракцій, що істотно прискорюють знос лемешів, лап культиваторів, дисків борін та інших робочих елементів. Традиційні матеріали й технології виготовлення та ремонту робочих органів не завжди забезпечують необхідний рівень зносостійкості, що зумовлює потребу в пошуку та обґрунтуванні нових

інженерних рішень, зокрема застосуванні сучасних методів поверхневого зміцнення, модифікації структури матеріалу та використанні зносостійких покриттів.

У зв'язку з цим актуальним є комплексне дослідження процесів зношування робочих органів ґрунтообробних машин, аналіз впливу матеріалів і технологій їх обробки на експлуатаційні показники, а також розроблення технічно та економічно доцільних заходів щодо підвищення їх зносостійкості. Реалізація таких рішень сприятиме підвищенню довговічності ґрунтообробних машин, зниженню витрат на технічне обслуговування і ремонт, забезпеченню стабільної якості обробітку ґрунту та підвищенню конкурентоспроможності вітчизняного сільськогосподарського виробництва.

Мета дослідження полягає у збільшенні строку служби робочих органів дискових ґрунтообробних машин шляхом застосування ручного електродугового наплавлення з одночасним забезпеченням ефекту самозагострювання ріжучих кромок.

Завдання дослідження:

1. Здійснити аналіз конструктивних особливостей, умов експлуатації та характеру зношування дискових робочих органів ґрунтообробних машин з метою виокремлення основних чинників, що визначають їх довговічність і інтенсивність затуплення.
2. Оцінити триботехнічні властивості наплавлених покриттів, отриманих у результаті ручного електродугового наплавлення.
3. Провести експериментальні польові випробування дискових робочих органів зі зміцненими (наплавленими) шарами в реальних умовах сільськогосподарської експлуатації.
4. Дослідити закономірності формування та прояву ефекту самозагострювання дисків із наплавленими покриттями у процесі їх зношування та виконати відповідний аналіз.

Об'єкт дослідження – процес спрацювання робочих органів дискових ґрунтообробних машин під час їх експлуатації.

Предмет дослідження – вплив зносостійких наплавлених шарів, сформованих методом ручного електродугового зміцнення, на триботехнічні властивості та здатність до самозагострювання ріжучих крайок дискових робочих органів у польових умовах.

Методи дослідження. Лабораторні та експлуатаційні випробування виконувалися з використанням методів і методик, що відповідають вимогам державних та галузевих нормативних документів. Оцінювання зносостійкості поверхневого шару після електродугового зміцнення здійснювали на спеціально розробленій установці із застосуванням авторської методики. Узагальнення й аналіз результатів лабораторних та експлуатаційних досліджень проводили із використанням математико-статистичних методів та пакету прикладних програм на персональному комп'ютері.

Перелік **публікацій** за темою роботи:

1 Байбула А, Халімовський С. **Ковальчук Д.** Триботехнічні процеси на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин. Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості: збірник матеріалів І Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Кам'янець-Подільський, 16 жовтня 2025 року). Кам'янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. С. 249-254

2. Деревянко Д.А., Байбула А.Ф., **Ковальчук Д.С.** Кушим Р.В. Аналіз умов роботи та зношування стрілчастих лап культиваторів. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. С. 116-121.

3. **Ковальчук Д. С.** Аналіз методів підвищення зносостійкості лемешів плугів. Покращення техніко-економічних показників тракторів під час

виконання сільськогосподарських операції. Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково- педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 20-23.

Практичну значущість мають: робочі органи дискових ґрунтообробних машин ріжучі кромки яких зміцненні ручним електродуговим наплавленням, що дозволяє забезпечити ефект їх самозагострювання.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 29 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 62 сторінки комп'ютерного тексту, містить 11 рисунків та 1 таблицю.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

1.1. Механізм абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин

Під час обробітку ґрунту робочі органи сільськогосподарських машин піддаються інтенсивному зношуванню. Частинки ґрунту – пісок, пил, дрібні камінці та мінеральні включення – діють як абразив, постійно дряпаючи й стираючи поверхні деталей. Абразивне зношування є одним з найпоширеніших видів зносу: за оцінками, на нього припадає значна частка (до 50–60%) випадків виходу з ладу ґрунтообробних робочих органів. Це призводить до суттєвих фінансових витрат на заміну деталей і ремонт техніки, простоїв у роботі, а також до зростання енерговитрат – зношені, затуплені органи потребують більшого тягового зусилля та підвищують витрату пального.

Абразивне середовище ґрунту є агресивним: у зоні контакту «метал–ґрунт» одночасно відбуваються механічні, фізичні і навіть хімічні процеси руйнування поверхні. Проте основним чинником зносу при взаємодії із ґрунтом є механічне абразивне тертя, яке з позицій трибології зумовлює мікрорізання і мікропластичне деформування металу твердими частинками. Внаслідок цього поверхня робочого органа поступово втрачає матеріал, змінює форму і властивості.

Проблема зношування робочих органів ґрунтообробних машин має важливе прикладне значення. Зменшення ресурсу цих деталей означає часті заміни, що в умовах масштабного аграрного виробництва виливається у великі витрати металу та коштів. Наприклад, звичайні сталеві лемеші плугів при інтенсивній експлуатації потребують підточування вже після обробки близько 8–10 гектарів, а лапи культиваторів – ледь не щозміни. Швидке туплення ріжучих крайок і стирання поверхонь знижує якість обробітку ґрунту та

продуктивність праці. Таким чином, підвищення зносостійкості ґрунтообробних робочих органів є актуальним завданням агроінженерії.

Для ефективного вирішення цього завдання необхідне всебічне розуміння механізмів абразивного зношування з точки зору трибології – науки про тертя та знос. Метою даної статті є узагальнення знань про механізми абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин та фактори, що на нього впливають, а також розгляд інженерних підходів до підвищення зносостійкості. Стаття структурована наступним чином: спочатку подано класифікацію та характеристики основних типів робочих органів ґрунтообробної техніки; далі викладено теоретичні основи абразивного зношування з позицій трибології; розглянуто особливості зносу різних типів робочих органів, зокрема дискових, яким приділено окрему увагу; проаналізовано вплив експлуатаційних факторів на інтенсивність зношування; нарешті, описано технічні методи підвищення зносостійкості та зроблено висновки.

До робочих органів ґрунтообробних машин належать деталі та вузли, які безпосередньо взаємодіють із ґрунтом у процесі виконання технологічних операцій – оранки, культивації, дискування, боронування, глибокого розпушування тощо. Різноманітність ґрунтообробних знарядь обумовила велику кількість типів робочих органів, що відрізняються за конструкцією, формою і принципом дії. Нижче розглянемо основні їх різновиди та особливості будови, важливі з точки зору зношування.

Лемеші та корпуси плугів. Леміш – це клиноподібний різальний елемент плуга, призначений для підрізання нижнього шару пласта ґрунту. Разом з відвалом (криволінійною платівкою, що перевертає пласт) леміш утворює корпус плуга – головний робочий орган для оранки. Лемеші виготовляються зі сталі підвищеної міцності, мають гостру ріжучу кромку (лезо) і загострений носок. Відвал зазвичай теж сталевий, з плавним вигнутою поверхнею. Під час руху плуга леміш врізається в ґрунт, відокремлюючи пласт, який підіймається і пересувається по поверхні відвала, перевертаючись. Таким чином, леміш працює

в умовах інтенсивного тертя ґрунту об передню грань і нижню площину лемеша, а відвал зазнає тертя ґрунтової маси, що ковзає по ньому. Особливість цих органів – велика площа контакту з ґрунтом і значний тиск на одиницю поверхні в зоні леза, що зумовлює високе абразивне навантаження.

Лапи культиваторів. До цієї категорії відносяться стрілчасті лапи культиваторів, плоскорізи, чизельні наконечники (долота) глибокорозпушувачів та інші різновиди робочих органів для розпушування ґрунту. Стрілчаста лапа культиватора має форму широкого трикутного леза, яке під час роботи рухається під поверхнею ґрунту паралельно їй, зрізуючи кореневу систему бур'янів і розпушуючи ґрунт. Лапи кріпляться до стійок і можуть мати різну ширину захвату (від 10–15 см до 30 см і більше). Їх ріжуча кромка розташована під певним кутом атаки для оптимального входження в ґрунт. Наконечники чизельних і розпушувальних лап (так звані долота) – це вузькі клиноподібні деталі, що працюють на значній глибині для руйнування ущільненого шару ґрунту. Спільним для всіх лап є те, що вони зазнають сильного абразивного впливу на передній площині і особливо на ріжучих крайках. Лапи культиваторів виготовляються зі зносостійких сталей, іноді мають змінні або оборотні (двосторонні) наконечники, щоб подовжити строк служби.

Дискові робочі органи. Дискові робочі органи представлені насамперед дисками борін та дискових лушпильників, а також дисковими плугами і сошниками. Диск борони – це круглий сталевий диск діаметром зазвичай 400–700 мм, товщиною 3–8 мм, часто увігнутої (сферичної) форми. Диски встановлюються на спільній осі або індивідуальних маточинах під кутом до напрямку руху та з нахилом, завдяки чому при поступальному русі агрегату вони обертаються і врізаються в ґрунт, розрізаючи його та частково подрібнюючи грудочки. Дискові плуги мають схожі диски, але більшого діаметру та масивності, призначені для оранки (їх диск глибше занурюється, замінюючи леміш і відвал). Дискові сошники сівалок – це, як правило, пара невеликих плоских або слабо вигнутих дисків діаметром 300–400 мм, встановлених під

кутом один до одного; вони створюють V-подібну борозенку для висіву насіння. Всі дискові органи працюють у режимі котіння з ковзанням: диск обертається, проте обов'язково відбувається і ковзне тертя ґрунту об його поверхню (через кут атаки та опір руху ґрунту). Особливість дисків – їх самовстановлення під дією сил опору (вони можуть дещо відхилятися або прискорювати обертання залежно від щільності ґрунту). Диски виготовляють з високоміцної сталі, нерідко з бористих марок, із наступним загартуванням до високої твердості поверхні (близько 50 HRC) для протидії зношуванню.

Ножі фрез та активних ґрунтообробних машин. Окрему групу становлять робочі органи активної дії – ротори фрез, культиваторів-фрез, ґрунтозмішувальних машин. Вони оснащені ножами різної форми (прямі, вигнуті, зубчасті тощо), які активно обертаються від приводу трактора. Ножі фрези зазвичай виготовлені зі сталі середньої або високої твердості (наприклад, ресорної 65Г або аналогів), мають загострену ріжучу частину. Під час роботи вони обертаються з великою кутовою швидкістю, врізаючись у ґрунт і дроблячи його на дрібні фракції. Це створює складні умови зношування – поєднання абразивного тертя та ударних навантажень при зустрічі з твердими грудками або камінцями.

Таким чином, робочі органи ґрунтообробних машин можна умовно класифікувати на: (а) лемішні (клиноподібні нерухомі різальні органи, що рухаються поступально – плуги, плоскорізи тощо); (б) лапи та долота (пласкі або вузькі робочі елементи для розпушування, які рухаються поступально, часто під пружними стояками); (в) дискові (обертові органи пасивної дії – котяться по ґрунту під час поступального руху); (г) ротори з ножами (обертові органи активної дії з примусовим обертанням). Кожна з цих груп має свої конструктивні особливості, що впливають на характер взаємодії із ґрунтом і, відповідно, на механізм та інтенсивність зношування. Далі розглянемо трибологічні основи абразивного зношування загалом, а потім специфіку зносних процесів для різних типів органів.

Поняття абразивного зношування. Абразивним зношуванням називають прогресуюче руйнування (втрату матеріалу) поверхні деталі внаслідок механічної дії твердих частинок або тіл, що труться об цю поверхню. Інакше кажучи, абразивний знос – це знос шляхом дряпання, різання або шліфування поверхні твердішими включеннями. У випадку ґрунтообробних машин роль абразиву виконують мінеральні частинки ґрунту: піщинки кварцу, польового шпату, окислів та інші фрагменти гірських порід, а також випадкові тверді домішки (дрібний гравій, уламки каміння). Твердість цих абразивів, як правило, вища за твердість сталі робочих органів, тому при контакті вони здатні врзатися в поверхню металу і зрізати (вишкребати) його дрібні часточки.

Трибологічний погляд на абразивне тертя. З точки зору трибології, тертя між твердою поверхнею робочого органа і ґрунтовою масою має комплексний характер. На відміну від тертя метал–метал, де значну роль можуть відігравати адгезійні (молекулярні) сили, в системі метал–ґрунт домінує механічна складова тертя. Можна стверджувати, що механізм тертя тут носить переважно молекулярно-механічний характер з переважанням деформаційної (абразивної) складової і незначним внеском адгезії. Поверхневі молекулярні зв'язки між ґрунтом і металом слабкі або швидко руйнуються, адже між ними постійно вклинюються тверді зерна абразиву. Таким чином, процес тертя фактично зводиться до багаторазового мікрорізання і мікроплугування металу цими зернами. В зоні контакту можуть також проявлятися фізичні явища – нагрівання від тертя, наклеп (зміцнення) поверхневого шару металу від ударів частинок, іноді окиснення поверхні. Проте теплові та хімічні ефекти в умовах ґрунту зазвичай мінімальні через відносно невелику швидкість і добру теплопровідність ґрунтової маси (ґрунт відводить тепло і охолоджує деталь). Тому абразивне зношування розглядають в першу чергу як результат чисто механічної взаємодії.

Двофазне та трифазне абразивне зношування. В трибології виділяють два основні випадки абразивного зносу, залежно від стану абразивних частинок: зношування закріпленими абразивами (так зване зношування за схемою двох тіл)

і зношування незакріпленими абразивами (схема трьох тіл). Зношування закріпленим абразивом відбувається тоді, коли тверді зерна жорстко фіксовані щодо поверхні, що третється, і не можуть вільно рухатись. Уявімо собі частинку піску, щільно втиснуту в товщу ґрунту або в поверхню деталі, – коли метал ковзає відносно цієї частинки, вона діє подібно до різального інструменту (різця), врізаючись і прорізаючи борозенку. Такий механізм іноді називають різальним або жолоблюючим абразивним зносом. Натомість зношування незакріпленим абразивом має місце, коли абразивні частинки вільно перекочуються між двома тертьовими поверхнями. В цьому випадку зерна поводяться як дрібні кульки або ролики, що потрапили під деталь – вони теж дряпають і шліфують поверхню, але дещо іншим чином. Незакріплений абразив не настільки інтенсивно врізається, зате спричиняє мікроудари з різних напрямків і абразивне полірування. В технічній літературі перший тип (два тіла) також описують як абразивне зношування шліфуванням, а другий (три тіла) – як зношування абразивним потоком.

У реальних умовах роботи ґрунтообробного органа абразивний процес часто займає проміжне положення між цими двома крайніми випадками. Ґрунт – це суміш зерен різного розміру, зв'язаних між собою силами зчеплення (особливо у вологому стані) або навпаки, майже розсипчастих (у сухому стані). Частина частинок може бути відносно закріплена ґрунтовою масою при тиску робочого органа – такі зерна діють як фіксований абразив на зразок леза, прорізаючи подряпини. Інші зерна прокочуються по поверхні деталі разом із потоком ґрунту, виконуючи роль третього тіла. Таким чином, абразивне зношування ґрунтообробних інструментів – комбінований дво-/трьохтільний процес, де співвідношення механізмів залежить від стану ґрунту (вологість, щільність, зернистість) і режиму роботи (тиск, швидкість).

Мікромеханізми руйнування поверхні. При абразивному зношуванні можна виділити кілька мікроскопічних режимів взаємодії абразивного зерна з металом, які визначають характер поверхневих пошкоджень:

Мікрорізання. Це режим, за якого тверда частинка рухається вздовж поверхні і настільки сильно врізається в метал, що відокремлює його фрагмент у вигляді стружки або порошок. Фактично відбувається мініатюрний процес різання металу: утворюється борозна (подряпина) і виходить зношувальний продукт (металева пилинка). Мікрорізання – найефективніший з точки зору зняття матеріалу механізм, він призводить до швидкої втрати маси деталі. Здебільшого мікрорізання має місце при високій твердості абразиву відносно матеріалу деталі та при гострому профілі зерна.

Мікропругування (мікрооранка). В цьому випадку абразивне зерно також врізається в поверхню, але не настільки глибоко, щоб вирізати частинку металу повністю. Замість цього зерно нагортає перед собою гребінець матеріалу, подібно до плуга, що оре ґрунт. Метал зазнає пластичної деформації: утворюється борозна, по краях якої підняті валки деформованого матеріалу. Частина матеріалу може залишитися привареною до основи, частина – відшаруватися у вигляді дрібних лусочок. Мікрооранка характерна, коли абразив трохи твердіший або співмірний за твердістю з металом деталі, а також при більш тупому куті атаки зерна.

Мікроклиноутворення і тріщиноутворення. Якщо абразивна частинка застрягла або сильно натиснута на поверхню, вона може діяти як клин, що розколює матеріал. В зоні контакту виникають дуже високі напруження, метал деформується і може утворити тріщини, які розповсюджуються під поверхнею. Такі мікротріщини при повторних навантаженнях призводять до викришування дрібних шматочків матеріалу. Цей механізм близький до втомного (контактна втома), але ініціюється саме абразивним ударом. Він більш типовий при ударно-абразивному навантаженні (наприклад, частинка ударяє під гострим кутом на високій швидкості) та для матеріалів з малою пластичністю (крихких або надто твердих).

Насправді процес зношування включає всі три зазначені режими в різних комбінаціях. Наприклад, дрібні гострі частинки кварцу можуть викликати

мікрорізання, тоді як більш округлі зерна піску – мікроплугування, а випадкові удари гравію – локальне мікротріщиноутворення. Характер пошкоджень поверхні (глибина і ширина борозен, наявність наклепу чи тріщин) є критерієм, за яким трибологи визначають домінуючий механізм зносу.

Вплив твердості та властивостей матеріалу. Одним з головних чинників, що визначають інтенсивність абразивного зношування, є твердість матеріалу робочого органа порівняно з твердістю абразивних частинок. Чим твердіша поверхня деталі, тим важче абразиву врізатися і тим більше він схильний до проковзування/перекочування (тобто до мікрооранки чи полірування замість різання). Зносостійкі сталі, загартовані до високих твердостей, за інших рівних умов зношуються повільніше, ніж м'які. Це підтверджує емпіричний закон, відомий у трибології (закон Архарда): об'єм зносу обернено пропорційний твердості матеріалу при даному навантаженні та пройденому шляху тертя. Водночас надмірна твердість може знизити в'язкість матеріалу і збільшити крихкість, що загрожує іншим механізмом руйнування – ламанням при ударах. Тому матеріал робочого органа вибирають з компромісом: достатньо твердий для протидії стиранню, але достатньо в'язкий, щоб не тріскатися на камінні.

Окрім твердості, важливі й інші фізико-механічні властивості: міцність, пластичність, структура. Наприклад, сталь з дрібнозернистою структурою, міцними карбідами на поверхні може краще чинити опір абразиву. Поверхневий наклеп (зміцнення холодним деформуванням) іноді підвищує місцеву твердість, знижуючи подальший знос. Проте у випадку дуже інтенсивного стирання наклепаний шар швидко видаляється.

Отже, теоретичний аналіз показує, що абразивне зношування робочих органів – це складний процес, що залежить від геометрії та руху абразивних частинок, їх твердості і форми, від навантаження і швидкості тертя, а також від властивостей матеріалу деталі. Розглянувши загальні принципи, перейдемо до того, як ці механізми реалізуються на практиці для різних типів робочих органів ґрунтообробних машин.

Конструктивні відмінності робочих органів визначають характер контакту з ґрунтом, а отже, і специфіку їхнього зношування. У цьому розділі проаналізуємо, як саме зношується кожен з основних типів органів – лемеші, лапи, ножі – і які механізми домінують в кожному випадку.

Лемеші та відвали плугів. Умови роботи: леміш плуга ріже нижній шар ґрунту горизонтально, тоді як відвал піднімає та перевертає пласт. Леміш постійно знаходиться в зоні високого тиску, особливо на носку (передньому нижньому куті) та на ріжучій крайці. Відвал зазнає тертя ґрунту по всій своїй увігнутій поверхні під час перевертоту пласта. Характер зношування: леміш зношується переважно шляхом інтенсивного абразивного різання на своїй передній грані. Гостра ріжуча крайка поступово тупиться – стає округлою, втрачає гостроту через сточування металу. Носок лемеша (найперший елемент, що вступає в ґрунт) часто спрацьовується швидше за інші частини: він може навіть відчутно “стоочуватися”, зменшуючи довжину лемеша. На відвалі спостерігається дещо інший знос – його поверхня поступово шліфується потоком ґрунту, який ковзає при перевертанні. Відвал з часом стає гладеньким і блискучим (полірується дрібними частками), але водночас товщина його зменшується. Найбільший знос відвала часто відмічають у середній частині – там, де найінтенсивніше третиться ґрунт під час перевертання. Механізм: для лемеша домінує двотільний абразивний знос – ґрунт, особливо твердий і сухий, діє як суцільний абразивний шар, зерна якого вриваються в метал лемеша. Подряпини на лемеші зазвичай паралельні напрямку руху ґрунту по ньому. Для відвала механізм ближчий до трьох тіл: між відвалом і пласлом землі часто є шар рухомих ґрунтових частинок, що перекочуються – вони полірують поверхню. Втім, на вході пласта на відвал також можливе часткове вривання зерен, тому біля нижнього краю відвала можуть бути видимі дрібні подряпини. Наслідки: сточування лемеша призводить до втрати ним форми – леміш втрачає свої кутові обриси, зменшується по висоті та довжині. Це негативно впливає на якість оранки: тупий леміш ріже гірше, підвищується тяговий опір, утворюється

нерівномірна борозна. Тому в польових умовах лемеші часто періодично підточують (відновлюють кромку шліфуванням) або наплавляють твердим металом. Відвали зазвичай не правлять, їх заміна здійснюється при надмірному стоншенні чи деформації.

Культиваторні лапи (стрілчасті). Умови роботи: лапи культиватора встановлюються під невеликим кутом до горизонталі і рухаються на сталій глибині, зрізуючи шар ґрунту. Передня (нижня) поверхня лапи контактує з ґрунтом, а задня – направлена вгору. Ріжуча кромка (передній край лапи) безперервно врізається у ґрунт. Характер зношування: основний знос відбувається на передньому ріжучому краї лапи. Спочатку кромка може мати заводське загострення, але дуже швидко воно зникає – край стає закругленим. Потім, із продовженням роботи, ширина лапи зменшується: метал з обох боків крайки сточується, і сама лапа поступово втрачає свою розгорнуту «стріловидну» форму, наближаючись до трикутника з меншою основою. Також спрацьовується нижня площа лапи – вона шліфується ґрунтом, може утворитися невеликий поздовжній згин чи хвилястість від нерівномірного зняття матеріалу. Механізм: в зоні ріжучої кромки – двохтільне абразивне зношування (зерна ґрунту діють як різці, які дряпають край, знімаючи матеріал). По нижній поверхні лапи, за кромкою, часто ковзає шар ґрунту – там реалізується трибологічна ситуація близька до трьох тіл (часточки прокочуються, полірують). Якщо лапа проходить через ділянки з твердими включеннями (камінням), можливі додатково сколи країв або тріщини, але здебільшого це характерно для глибших чизельних доліт. Наслідки: як тільки лапа значно звужується і втрачає площу різальної поверхні, ефективність культивації падає – вона залишає необроблені смуги між проходами. Зношену лапу доводиться або перевертати (якщо конструкція оборотна і друга кромка ще ціла), або замінювати. З огляду на швидкий знос, багато стрілчастих лап виготовляють зі змінними наконечниками або роблять їх дешевими змінними елементами.

Долотоподібні наконечники (чизелі, глибокорозпушувачі). Умови роботи: ці органи працюють на більшій глибині (30–50 см), розпушуючи ґрунт без перевертання. Наконечник-долото зазвичай вузький, товстий, з дуже гострим кінчиком і поступово розширюється догори. Він відчуває високу концентровану силу на самому вістрі, розколюючи щільний ґрунт. Характер зношування: найшвидше спрацьовуються вістря доліт – гострий кінчик сточується і округлюється, стаючи «тупим носом». Чим тупіший наконечник, тим важче йому проникати далі, тож знос має тенденцію самоприскорюватися (зростає опір – більший тиск – ще більший знос). Передня грані долота (ліві та праві боки клина) теж зношуються – на них з'являються потертості, борозни від ґрунту. Іноді на долотах спостерігається відколювання частин матеріалу збоку або зверху, якщо вони натрапляють на тверді предмети. Механізм: переважає абразивне різання на вістрі (бо там весь тиск, зерна діють як різці). По боках – комбінація різання і плугування, оскільки ґрунт розділяється клином. Важливо, що долота часто працюють у вологішому ґрунті (глибше – більше вологи), тож частково середовище більш «м'яке», але там же і тиск більший. Якщо долото входить у щільний шар, може мати місце ударно-абразивний ефект (вібрації, удари). Наслідки: значне зношення долота сильно знижує продуктивність глибокого рихлення – тупим долотом трактор ледве тягне знаряддя, глибина обробки падає. Тому конструктивно долота роблять змінними: заміна зношеного наконечника на новий або його наплавлення є стандартною процедурою.

Ножі ротаційних фрез та подрібнювачів. Умови роботи: ножі активних фрез обертаються з високою швидкістю (сотні обертів на хвилину), врізаючись у ґрунт зверху і перемішуючи його. Вони одночасно відчувають опір ґрунту і ударні впливи від камінців чи щільних грудок. Характер зношування: у таких ножів найперше тупиться різальна крайка – вона може бути прямою або зубчастою. Висока швидкість сприяє швидкому сточанню металу по всій довжині леза. Якщо ніж вигнутий (гакоподібний), то зовнішній вигнутий бік, що контактує з ґрунтом, шліфується і стає блискучим, а сам ніж тоншає. Можуть

з'являтися зазубрини або виламування шматочків по крайці при ударах об тверді предмети. Механізм: тут важливу роль відіграє ударно-абразивне зношування. При кожному оберті ніж зустрічається з ґрунтом: якщо він м'який – відбувається абразивне різання (аналогічно різцю, що ріже ґрунт). Якщо трапляється камінчик – відбувається удар, який може викликати мікротріщини або сколи. Таким чином, абразивний механізм (мікрорізання, мікрооранка) чергується з ударними навантаженнями. Через високу швидкість тертя частково підвищується температура леза, іноді можна помітити сліди «відпущення» стали (змінення кольору металу) на сильно зношених ножах – це свідчить про термічне навантаження, яке теж сприяє зносу. Наслідки: зношені ножі фрези рубують ґрунт значно гірше, залишають великі грудки, потребують більшої потужності. Їх зазвичай замінюють новими доволі часто, оскільки відновлення (наприклад, заточування) не дуже ефективне – форма вже змінена і лезо відкинуло твердість після нагрівів.

Інші види робочих органів. Сюди можна віднести, наприклад, дискові та ножові сошники сівалок (вони ріжуть борозенку під насіння), зуби культиваторів і борін (дротяні або пластинчасті зуби, що розпушують поверхню), лапи та ножі бурякопідйомників чи картоплекопачів (вони теж контактують із ґрунтом). Принцип зношування у них схожий до вже описаних: працюючі грані сточуються абразивом, виникає закруглення ріжучих частин, зменшення розмірів або зміна профілю. Наприклад, зуби ротаційної борони (ті, що схожі на зірочки) поступово втрачають гостроту зубців, стають коротшими і тупішими.

Узагальнення. Попри різницю форм і функцій, різні робочі органи мають спільну закономірність зношування: найбільш інтенсивно зношується та частина, що безпосередньо здійснює різання або зустрічає перший контакт із ґрунтом (ріжучі крайки, вершини, зовнішні кромки дисків). Поверхні, по яких рухається ґрунт, зношуються рівномірніше, шляхом шліфування і поступового стоншення металу. У всіх випадках абразивне зняття матеріалу призводить до втрати геометричних розмірів та робочої форми деталей: леза тупляться, деталі

вкорочуються, тоншають, можуть з'являтися локальні вигини чи хвилястість на поверхні. Це неминуче погіршує якість виконання технологічного процесу – наприклад, зношений леміш гірше ріже пласт, зношений диск борони дрібніше подрібнює ґрунт і не тримає глибину, зношена лапа лишає більше бур'янів. Тому контроль зношування і своєчасна заміна чи відновлення робочих органів – необхідна частина експлуатації ґрунтообробної техніки.

У наступному розділі особливу увагу приділено дисковим робочим органам, оскільки вони мають деякі відмінні риси зношування, пов'язані з їх обертальним рухом та формою.

Диски ґрунтообробних знарядь – один з найпоширеніших типів робочих органів, зокрема в сучасному землеробстві широко застосовуються дискові борони, луцильники, мульчувачі, а також висівні апарати з дисковими сошниками. Розглянемо детальніше, як зношуються дискові робочі органи і які фактори на це впливають.

Специфіка контакту диска з ґрунтом. На відміну від нерухомого леза, диск під час руху машини обертається навколо своєї осі. Ідеально уявляючи, диск міг би котитися по ґрунту без ковзання, як колесо, і тоді знос був би мінімальним (лише незначне тертя від деформації ґрунту). Однак реальна робота диска відрізняється: диск встановлений під кутом атаки ($10\text{--}25^\circ$ до напрямку руху) і має увігнуту форму. При поступальному русі він занурюється в ґрунт і частково котиться, але одночасно відбувається й бічне ковзання, оскільки диск ріже і відкидає ґрунт у бік. Це означає, що різні точки на поверхні диска зазнають різних траєкторій тертя. Загалом край диска рухається відносно ґрунту з найбільшою швидкістю і під найбільшим кутом, тому там спостерігається найсильніше зношування. Центральна частина диска (ближче до маточини) менш задіяна в різанні і більше котиться, тож знос там значно менший.

Розподіл зносу по диску. Практичні спостереження показують, що після тривалої експлуатації діаметр дисків зменшується – скажімо, диск діаметром 610 мм («24 дюйми») може сточитися до 550–570 мм перед вибуттям. Це результат

рівномірного стирання по всій окружності. Водночас профіль кромки може втрачати форму: гострий фасковий край зникає, кромка стає більш тупим заокругленням. Якщо диск гладкий, то він рівномірно втрачає матеріал по колу; якщо диск зубчастий (з вирізами-зубцями по периметру), то зубці зношуються швидше: вони можуть ставати коротшими, згладжуватися і навіть обламуватися. Нерідко після напрацювання зубчастий диск фактично перетворюється на майже гладкий, оскільки зубці сточуються.

Цікавий момент – різниця зносу між опуклою і увігнутою сторонами диска. Конструктивно диск ставлять увігнутою стороною вперед по напрямку руху (щоб він відкидав ґрунт убік). Отже, увігнута (внутрішня) сторона диска більшою мірою контактує з переміщуваною ґрунтовою масою. На цій стороні ближче до краю часто помітне інтенсивне шліфування – утворюється матова потерта зона. Опукла (зовнішня) сторона менше третиться ґрунтом, більше контактує з повітрям або з поверхнею борозни, тому знос там менший і поверхня може залишатися відносно гладкою. Однак край диска (сама ріжуча кромка) зношується з обох сторін, тому що абразивні частки стирають його при різанні як з переднього, так і з заднього боку кромки.

Трибологічний механізм зносу диска. В зоні контакту диска і ґрунту одночасно реалізуються два режими тертя:

Режим котіння (rolling) – елементи поверхні диска, які котяться майже без відносного прослизання. Це частіше відноситься до центральної частини диска або до компонент вертикального тиску. Котіння саме по собі не спричиняє значного абразивного зняття металу, але не можна сказати, що диск котиться без ковзання – через нерівності та зміну радіуса контакту все ж є мікроскопічне прослизання.

Режим ковзання (sliding) – особливо на периферії диска, де відбувається різання ґрунту. Там частинки ґрунту ковзають по металу, як у випадку звичайного леза. Можна сказати, що кожна точка на кромці диска протягом одного оберту виконує функцію різця, потім виходить з контакту.

Через таку циклічність навантаження цікавим є ефект наклепу і самозагартування крайового шару диска. Коли диск новий, його край під час перших годин роботи може дещо зміцнитися: постійне ударно-абразивне навантаження пластично деформує поверхню, збільшуючи її твердість (це особливо характерно, якщо диск виготовлено з сталі, схильної до деформаційного зміцнення, наприклад, високовуглецевої з мартенситною структурою). Такий наклеп може трохи підвищити опір зносу. Однак надалі цей зміцнений шар поступово сточується абразивом. Баланс між утворенням наклепу і його зняттям визначає стабільність зносу: часто спостерігається, що після первинного швидкого сточування (притирання нового диска) швидкість зносу трохи зменшується і виходить на більш-менш сталий рівень.

Вплив режимів роботи на знос дисків. Дискові борони можуть працювати на різних глибинах і швидкостях. При збільшенні швидкості руху (наприклад, з 6 до 12 км/год) частота обертання диска і енергія контакту з ґрунтом зростають – це призводить до різкішого і швидшого зношування. Особливо в сухому ґрунті високі швидкості дискування “виїдають” крайки дисків за короткий час. Глибина обробітку теж важлива: коли диск занурений глибше, площа його контакту з ґрунтом більша, отже, більше абразиву діє на поверхню. З іншого боку, при малій глибині (наприклад, лушення стерні на 5 см) диск контактує більше з верхнім, часто більш піщаним шаром – що теж дуже абразивно. Отже, найгірший випадок для диска – швидка робота по сухому піщаному ґрунту: тут сумуються всі фактори, що максимізують знос (твердість абразиву, відсутність змащення вологою, висока швидкість, великий тиск через заглиблення).

Особливості зношування дискових сошників. Дискові сошники висівних машин працюють дещо інакше, ніж боронні диски. Вони значно менші діаметром і тонші, до того ж часто працюють попарно. Вони повинні прорізати як ґрунт, так і рослинні рештки (стерню) на поверхні поля. Зношування сошників проявляється у зменшенні їх діаметра і затупленні країв. Оскільки сошник працює переважно як ніж (ріже вертикально), його знос наближений до

двотільного абразивного – крайка виконує різання ґрунту як лезо ножа. З часом край стає тупішим, і сошник вже не розрізає рослинні рештки, а мнє їх, що погіршує якість сівби. Тому точність висіву (глибина і однорідність борозенки) погіршується при зношених сошниках. У господарствах їх міняють, коли діаметр зменшиться на певну величину (наприклад, на 10–15% від нового). Цікаво, що два спарені диски-сошники притираються не тільки об ґрунт, а й один об одного (вони стикаються під кутом, утворюючи щілину). Це тертя метал-метал, яке теж вносить вклад у знос (хоча спеціально встановлюють прокладки, щоб диск стирав не метал, а полімер). Тому сошники – дуже відповідальні робочі органи, їх знос суттєво впливає на агротехнічний результат, і їм приділяють значну увагу при обслуговуванні.

Небезпека ударного навантаження для дисків. На відміну від лемешів, диски при зустрічі з великим каменем або іншим твердим перешкодою не можуть «відіграти» назад (плуг зазвичай підскакує або спрацьовує запобіжний механізм). Диск же часто жорстко закріплений на осі, і удар припадає на його край. Це може спричинити викришування металу по кромці (відколюються зубці або шматочки крайки), або навіть утворення тріщин, що йдуть від краю. Якщо диск дуже твердий (після гартування), він більш схильний саме до тріщиноутворення при ударі; якщо м'якший – диск може погнутися, утворити вм'ятину, але не тріснути. Тому виробники прагнуть до оптимального балансу: дискові ножі борін виготовляють з легованої бором сталі, гартують і відпускають до твердості приблизно 48–52 HRC – так диск має достатню зносостійкість, але ще зберігає трохи в'язкості для протистояння ударам. У конструкціях також передбачають пружні елементи – пружинні стійки або гумові амортизатори кріплення дисків, щоб поглинати ударні навантаження (це опосередковано зменшує і абразивне зношування, бо диск краще «обтікає» перешкоди, а не дряпає їх).

Дискові робочі органи зношуються дещо повільніше на одиницю площі контакту, ніж, скажімо, лемеші, оскільки частина тертя перетворена на котіння.

Однак загальна протяжність шляху контакту (усе коло диска) та неперервність роботи великою групою дисків в агрегаті призводять до значного сумарного зносу. Диски поступово зменшуються у розмірі і втрачають ефективність. Вони, як правило, не підлягають відновленню заточуванням (хіба що зрідка підточують край для кращого різання стерні), а замінюються новими при досягненні граничного зносу. Знання закономірностей зношування дисків допомагає планувати їх заміну та модернізацію (наприклад, використання дисків з твердими покриттями, що зносяться менше, як розглянемо далі).

Інтенсивність абразивного зношування робочих органів значною мірою визначається умовами, в яких експлуатується техніка. Навіть один і той самий робочий орган може служити як значно довше, так і зноситися в кілька разів швидше залежно від властивостей ґрунту, режиму роботи та інших факторів. Розглянемо основні експлуатаційні чинники і їх вплив.

Гранулометричний склад та абразивність ґрунту. Тип ґрунту – ключовий фактор. Відомо, що піщані і супіщані ґрунти викликають набагато більший знос, ніж глинисті або суглинки. Причина – високий вміст кварцевого піску. Кварц має твердість приблизно 7 за шкалою Мооса (близько 1100–1200 HV за Віккерсом), тоді як сталь робочих органів – 5–6 Мооса (300–600 HV). Отже, кварцові зерна легко дряпають сталь. У пісках велика частка таких твердих зерен і вони крупні, тому і абразивний ефект максимальний. Глинисті ґрунти містять в основному дуже дрібні часточки (алюмосилікати), які мають меншу твердість і обгорнуті глинистою плівкою – вони діють більше як полірувальна паста, а не як грубий абразив. Крім того, глинисті ґрунти при певній вологості липкі, вони можуть налипати на деталі, частково захищаючи метал від прямого контакту з піщинками. Суглинки та чорноземи займають проміжне положення: у них є і пісок, і глина, і вони можуть бути досить абразивними, якщо містять піщану фракцію. Бувають також специфічні ґрунти – наприклад, червоноземи з високим вмістом оксидів заліза, що теж досить тверді, або ґрунти з домішками

черепашнику (кальцій карбонату), який хоча м'якший за кварц, але все одно може дряпати метал у сухому стані.

Для оцінки абразивності ґрунтів використовують показник зношувальної здатності. В лабораторних умовах визначають відносну інтенсивність зносу еталонного зразка сталі різними ґрунтами. Наприклад, за одну умовну одиницю можуть брати знос у кременистому піску, тоді суглинок може давати 0,7 від цієї величини, а глина – лише 0,4. Хоча точні цифри різняться в залежності від методики, загальна тенденція очевидна: чим більше в ґрунті грубих твердих часток, тим вища його зношувальна здатність. При роботі на сильно піщаних ґрунтах (напр., ґрунти легкого гранулометричного складу) знос деталей іде дуже швидко – іноді в 2–3 рази швидше, ніж на важких суглинках при тій самій площі обробки.

Вологість ґрунту. Вологість суттєво впливає на характер тертя. Сухий ґрунт діє як сухий абразивний порошок: кожна піщинка безперешкодно дряпає метал. Ба більше, при відсутності вологи зменшується зв'язність ґрунту – частки легко відокремлюються і поведуться як незакріплений абразив (трифазний режим, найбільш шкідливий). З іншого боку, вологий ґрунт (помірна вологість, скажімо 10–20%) зазвичай менш абразивний. Вода виконує роль мастила та зв'язуючого: вона зменшує коефіцієнт тертя і склеює частинки в агрегати. Вологі грудочки ґрунту скоріше ковзають цілою масою, ніж розсипаються на окремі зерна, тому дряпають менше. Крім того, плівка води на поверхні металу зменшує прямий контакт з твердими частками. Експериментально підтверджено, що зносостійкість деталей в зволоженому піску вища, ніж у сухому. Перезволожений, талий ґрунт (болото) може і зовсім мало стирати метал, але там виникають інші проблеми – прилипання бруду, корозія. Замерзлий ґрунт (морозний) діє майже як твердий абразив: вода перетворюється на лід, а лід твердий і крихкий – при терті він дряпає метал і кришиться. Так, оранка підмерзлої землі дуже зношує плуги. Таким чином, оптимальний стан ґрунту з

точки зору мінімального зносу – помірно вологий, не пересохлий і не надмірно мокрий.

Наявність каміння та сторонніх включень. Ґрунти можуть містити гравій, щебінь, уламки порід. Велике каміння, з яким стикається робочий орган, спричиняє не лише абразивний, а й ударний вплив. Як зазначалося, удари можуть відколювати шматочки металу, утворювати тріщини, прогинати або деформувати деталі. Після такого пошкодження навіть абразивний знос може прискоритися (наприклад, утворена тріщина – це концентратор напружень, вона може розкриватися далі). Тому кам'янистість поля – дуже несприятливий фактор. Ударно-абразивний режим знижує ресурс кардинально: з деталей можуть вибиватися цілі фрагменти раніше, ніж вони рівномірно сточаться. В таких умовах часто застосовують спеціальні прийоми: наприклад, для плугів використовують відвальниці з накладними пластинами на носок, які беруть удар на себе; для дисків – пружні амортизатори тощо.

Крім каміння, впливають і антропогенні включення – уламки металу, бетон, сміття в ґрунті. Вони можуть бути навіть жорсткішими за природні камені і діяти аналогічно або гірше (наприклад, шматок металу може прорізати леміш як різцем).

Швидкість руху та кінематика роботи. Швидкість агрегату визначає відносну швидкість тертя між ґрунтом і робочим органом. Вища швидкість означає, що за одиницю часу деталь контактує з більшою масою ґрунту і часточки ударяють об неї сильніше. Енергія, що передається абразиву при ударі або терті, пропорційна квадрату швидкості – тому зростання швидкості може різко збільшити інтенсивність мікрорізання та мікроударів. Практично це підтверджується досвідом: наприклад, перехід від повільної оранки (5 км/год) до швидкісної (8 км/год і більше) помітно скорочує строк служби лемешів. Аналогічно, швидкісні дискові луцильники зношують диски швидше, ніж повільні важкі борони. Проте є й нюанс: при дуже великих швидкостях (скажімо, в експериментальних умовах 15–20 км/год для ґрунтообробних знарядь) частина

грунту відкидається від деталі так швидко, що контактний час зменшується – тобто абразив може не встигнути глибоко врзатися. Але це не компенсує повністю зростання енергії, тож сумарно знос все одно більший.

Глибина занурення і навантаження. Чим глибше працює робочий орган, тим більша площа його контакту з ґрунтом і тим більшу вагу ґрунту він переміщує. Зі збільшенням глибини (або ширини захвату інструменту) зростає опір руху, отже, збільшується контактний тиск між ґрунтом і деталлю. Вищий тиск призводить до сильнішого втиснення абразивних зерен в метал, що переходить тертя в більш інтенсивний режим (збільшується частка двохтільного зносу – різання замість проковзування). Тому глибока оранка зношує плуги помітно швидше, ніж мілка. Аналогічно, якщо культиватор притискати додатковим баластом, щоб він йшов стабільніше, – лапи зношуватимуться більше через підвищений тиск. Існує навіть такий ефект: у плугів, коли колесо трактора йде по щойно відораному ґрунту, крайні лемеші за колесом можуть різати на більшу глибину (через колію) і тому зношуються швидше, ніж ті, що йдуть по непорушеному пласту.

Конструктивні та регулювальні чинники. До них належать:

Кут атаки та кути встановлення. Правильне регулювання агрегату має велике значення. Якщо, наприклад, плуг погано відрегульований і лемеш встановлено під надто тупим кутом до напрямку руху, він не ріже, а більше тре ґрунт – виникає «гальмування», додатковий знос. Навпаки, оптимальний (паспортний) кут забезпечує різання з мінімальним тертям. Для дисків кут атаки рядка (кут до горизонталі і до напрямку) також впливає: збільшення кута атаки покращує проникнення, але збільшує бокове тертя.

Форма і товщина деталі. Тонкі та гострі робочі органи спочатку працюють ефективно (мале зусилля на різання), але ресурс товщини у них менший – вони швидко сточуються до критичної стоншеності або можуть навіть погнутися. Товсті і масивні деталі довше пручаються сточуванню, однак на початку потребують більшої тяги, більше труться. Тому виробники визначають

оптимальну товщину: наприклад, лемеш 6–8 мм, диск борони 5–6 мм. Якщо товщина зменшується внаслідок зносу до 3–4 мм, деталь вже близька до поломки або прорізання.

Поверхнева шорсткість. Гладка, відполірована поверхня менше піддається зносу, ніж груба шорстка. Нові деталі часто покриті окалиною або мають шорсткості після мехобробки – перші години роботи йде їх припрацювання (притирання). Після цього поверхня стає більш гладкою, і знос трохи уповільнюється. Якщо ж, наприклад, на лапі лишилися грубі сліди різання, вони можуть служити місцями концентрованого абразивного впливу (зерна зачіпляються і рвуть метал).

Наявність захисних накладок. Деякі конструкції передбачають змінні захисні пластини на найбільш зношуваних ділянках (наприклад, напольник або долото на лемеші). Ці елементи приймають на себе значну частину зносу і по мірі спрацювання замінюються, зберігаючи основну деталь. Їх застосування значно продовжує ресурс, але потребує контролю стану і своєчасної заміни.

Взаємодія з оточуючим середовищем. Робочі органи можуть зношуватися не тільки від абразиву, але й від корозії, особливо коли машина стоїть без роботи. Наприклад, після роботи на вологому полі деталі вкриті вологою і ґрунтом – це агресивне середовище, що спричиняє іржавіння. Корозія роз'їдає поверхневий шар металу, роблячи його пухким, слабким. Коли техніка знову виходить у поле, абразив дуже швидко знімає прокорозовану плівку і захоплює новий шар. Таким чином, цикл "робота – зберігання – робота" може прискорювати знос, якщо під час зберігання не були вжиті заходи проти корозії. Особливо це критично для міжсезоння: зношену, але ще не замінену деталь краще захистити (очистити й змастити), щоб іржа не доїдала її перед наступним сезоном.

Отже, умови експлуатації можуть суттєво подовжити або скоротити життя робочих органів. На практиці не завжди є можливість вибирати умови (тип ґрунту даний природою, погоду не змінити), але розуміння впливу факторів

дозволяє технічно пристосуватися. Наприклад, при посушливій погоді намагатися працювати рано вранці, коли є роса (більш вологий ґрунт – менший знос); уникати зайвого збільшення швидкості, якщо помітно інтенсивний знос; регулярно очищати деталі від налиплого ґрунту, бо під висохлою грудкою може накопичуватися абразивна пісок, що діє як шкірка; точно настроювати кут атаки і глибину, щоб уникнути даремного тертя. Крім організаційних заходів, важливу роль відіграють інженерні рішення, які зменшують негативний вплив факторів. Цим рішенням і присвячено наступний розділ.

Абразивне зношування повністю усунути неможливо – воно є платою за контакт із ґрунтом. Проте існує багато технічних прийомів і рішень, що дозволяють значно сповільнити знос і тим самим підвищити довговічність робочих органів. Розглянемо основні з них, починаючи від вибору матеріалів і закінчуючи особливими конструктивними заходами.

Вибір матеріалу та термічна обробка. Найперший крок – використання сталей з високою природною зносостійкістю. Як правило, це сталі з підвищеним вмістом вуглецю і легуючих елементів (марганцю, бору, хрому, нікелю та ін.), які після загартування набувають високої твердості. В Україні традиційно для лемешів, лап і дисків використовували сталь 65Г (російське позначення; український аналог – 65Mn або 70Г), що є пружинною сталлю з $\sim 0,65\%$ С і $\sim 0,9\%$ Mn. Сучасні диски борін часто виготовляють із борвмісних сталей типу 30MnB5 або 28MnCrB5 – вони містять $\sim 0,3\%$ С, 1–1,5% Mn, невелику добавку бору ($\sim 0,002$ – $0,005\%$) і трохи Cr, що дозволяє отримати після гартування твердість ~ 50 HRC при хорошій в'язкості. Такі сталі забезпечують в 1,5–2 рази більший ресурс, ніж звичайні вуглецеві сталі.

Термічна обробка відіграє вирішальну роль. Об'ємне гартування з відпуском – найпоширеніший метод зміцнення деталей. Після формування і механічної обробки деталей нагрівають до високої температури (850 – 900°C) і швидко охолоджують (у воді чи маслі), потім відпускають при 200°C для зняття крихкості. В результаті структура сталі перетворюється на мартенсит, твердість

зростає вдвічі проти сирого стану. Загартовані таким чином лемеші та диски мають твердість 45–55 HRC. Проте просте об'ємне гартування не завжди оптимальне: деталь стає твердою по всьому перетину, що при ударних навантаженнях (каміння) сприяє тріщинам.

Тому застосовують диференційовану термообробку:

Поверхнєве гартування (індукційне або високочастотне). Ріжучу кромку або робочу поверхню деталі нагрівають індукційним струмом локально, після чого швидко охолоджують. Виходить тонкий загартований шар високої твердості (60 HRC і більше) на поверхні, тоді як серцевина залишається відносно м'якішою і в'язкою. Це дає комбінацію зносостійкого зовнішнього шару з ударостійкою основою. Індукційно гартують, наприклад, лемеші плугів по кромці. Також практикують гартування цівковим полум'ям (наприклад, відвал плуга – нагрівають край газовим полум'ям і охолоджують).

Цементация і nitridation. Цементация – це насичення поверхні вуглецем і подальше гартування. Для деталей, які спочатку виготовлені з м'якої низьковуглецевої сталі, цементация дозволяє отримати дуже твердий поверхневий шар (до 0,5–2 мм товщиною) з надвисокою твердістю (до 60 HRC після гартування), тоді як серцевина залишається м'якою (не загартовується). Подібно діє азотування – насичення азотом, або нітроцементация (C+N). Ці методи дають чудову поверхнєву твердість і ще й підвищують корозійну стійкість. Втім, застосування їх на великих деталях може бути складним та дорогим. Але, наприклад, для невеликих ножів або сошників – цілком реально. Після зносу цементованого шару знос прискорюється, тож важливо, щоб шар був достатньої глибини.

Високомарганцеві сталі (ефект Гадфілда). Ще один підхід – матеріали, що зміцнюються самі при ударі. Класичний приклад – аустенітна марганцева сталь (~12% Mn, 1% C), яка у вихідному стані м'яка (~250 HB), але при ударному навантаженні різко наклепується до твердості 500 HB і більше. Такі сталі використовують для ковшів екскаваторів, дробарок. У ґрунтообробній техніці їх

застосування обмежене через високу вартість та складність обробки, але іноді виготовляють дуже відповідальні деталі (наприклад, ножі важких фрез) з подібних сплавів, щоб мати високу ударну витривалість і самозміцнення від наклепу.

Наплавлення твердосплавних шарів. Один з найефективніших методів продовжити життя деталі – наплавити на її зношувані частини надтвердий матеріал. Наплавлення виконується електрозварюванням: за допомогою спеціальних електродів або дроту наносять валик металу, що містить багато карбідів (часто використовують порошкові дроти з вмістом карбіду хрому, ніобію або вольфраму). Після остигання цей валик стає надтвердим (60–65 HRC і більше) і дуже стійким до стирання. Наплавляють зазвичай по ріжучих краях лемешів, на носок і лезо лап культиваторів, на верх доліт глибокорозпушувачів. В польових умовах також практикують самостійне наплавлення електродом типу Т-590, що утворює твердий шар з високим вмістом карбідів. Правильно наплавлені лемеші можуть служити в 2–3 рази довше стандартних. Мінус – поява внутрішніх напружень від зварювання, можливість відшарування наплавленого шару при ударах, а також те, що наплавлення потребує кваліфікації і витрат часу.

Більш сучасний різновид – твердосплавні вставки і елементи. Деякі виробники виготовляють лемеші і лапи з вставленими сегментами з карбіду вольфраму чи інших твердих сплавів. Найчастіше це маленькі пластинки, впресовані або приварені на передню кромку з кроком. При зносі основний метал сточується, а тверді пластинки виступають як зубці, приймаючи на себе абразив. Твердість карбіду вольфраму надзвичайно висока (близько 1500 HV, що значно перевищує твердість кварцу), тому такі вставки практично не зношуються – деталь виходжує ресурс у кілька разів більший. Виклик тут у тому, щоб надійно зафіксувати ці вставки: при сильному ударі вони можуть випасти або розколотися, якщо пайка чи зварювання недостатньо міцні.

Перспективним напрямком є нанесення покриттів методами напилення (термічного, плазмового, детонаційного). Це дозволяє створити тонкий (0,1–0,3 мм) шар надтвердого матеріалу на поверхні. Наприклад, плазмове напилення суміші карбіду вольфраму з кобальтовим сплавом (WC-Co) утворює покриття твердістю 1200–1400 HV. Воно значно збільшує стійкість до абразивного зносу. Подібні дослідження нині проводяться активно: покриття з карбідів, кераміки (Al_2O_3 , Cr_2O_3), композити показують скорочення зносу дисків і лап у 1,5–3 рази у порівнянні з непокритими. Втім, поки що ці методи дорогі, і їх застосовують в основному для техніки, що працює у вкрай абразивних умовах або де заміна деталей дуже трудомістка.

Конструктивні рішення для зносостійкості. Конструкція робочого органу може бути змінена так, щоб сповільнити його зношування або забезпечити краще використання ресурсу:

Самозагострювальні форми лез. Ідея самозагострювання полягає в тому, щоб при зношуванні геометрія ріжучого краю залишалася близькою до оптимальної (гострої). Одне з рішень – зробити деталь з різною твердістю на різних ділянках. Наприклад, ріжуча крайка лемеша гартується до дуже високої твердості, а прилегла частина лишається трохи м'якшою. Тоді в роботі м'якший метал сточується швидше, ніж сам край – утворюється протилежна заточка, і край весь час залишається відносно гострим виступом. Інший підхід – геометричний: спроектувати поперечний профіль так, щоб під час зносу він автоматично формував нову кромку. Приклад: деякі лапи роблять складеною з двох шарів сталі – твердіший зверху, м'якший знизу; коли низ стирається швидше, верхній шар виступає гострим лезом. Такі рішення значно знижують потребу в ручному заточуванні.

Змінні та оборотні деталі. Щоб ефективно використовувати матеріал, багато робочих органів роблять зі змінними наконечниками або двосторонньою симетрією. Змінний наконечник (долото) на лапі чи плузі дозволяє не викидати весь вузол, а лише замінити самий зношений фрагмент. Це економить і матеріал,

і час – фермер може швидко поміняти наконечники в полі. Оборотні лапи культиваторів мають два леза: коли одне сточується, лапу можна переставити іншою стороною, отримавши нове лезо. Це фактично подвоює строк служби за невеликої зміни конструкції.

Захисні екрани та накладки. Як згадано раніше, приставні деталі, що захищають основні, – це теж конструктивний прийом. Наприклад, на стійках культиваторів іноді ставлять змінні насадки (щічки), які беруть на себе знос замість основної стійки. На плугах – напольники, які приймають знос дна борозни, та передплужники, що зрізають верхній шар і тим самим бережуть основний корпус.

Амортизація та вільний хід. Щоб зменшити катастрофічні пошкодження від ударів (які опосередковано впливають і на абразивний знос), конструкції оснащують захисними механізмами. Пружинні стояки лап дозволяють їм відхилятися, коли є надмірне навантаження, тим самим зменшуючи контактний тиск і ймовірність сколу. Гідравлічні або пружинні предохранителі на плугах відкривають корпус при наїзді на перешкоду – леміш не дряпає камінь по всій площі, а вискакує з землі.

Спеціальні покриття проти налипання. Хоча це стосується більше адгезії ґрунту, але побічно впливає на знос. Якщо деталь покрити матеріалом, до якого не липне глина (наприклад, тефлонове напилення або гладка емаль), то менше грудок буде зависати на поверхні. Це означає, що менше абразиву затримується біля металу, отже, знос знижується. Такі покриття вже використовують на плугах для зменшення тертя – як бонус, деталі і повільніше стираються.

Оптимізація форми потоку ґрунту. Конструктивно можна змінити форму робочого органа так, щоб ґрунт легше відокремлювався від нього. Наприклад, відвали плугів нового покоління мають спеціальну просторову кривизну, яка краще кришить і перевертає пласт – завдяки цьому відвал менше треться однією й тією ж масою ґрунту, знос розподіляється рівномірніше. Для дисків – експериментують з формою вирізів і гофр (хвилясті диски), які начебто повинні

дрібніше подрібнювати ґрунт з меншим ковзанням, а значить і менше стиратися (правда, питання спірне, чи справді менше).

Впровадження нових матеріалів. Окрім металів, розглядають і композитні матеріали або покриття на полімерній основі. Наприклад, пробували виготовляти плоскорізи з набраних пластин гуми з вкрапленням абразивного зерна, щоб вони самі були як “наждак” проти ґрунту – така фантастична ідея, але поки практично не реалізована широко. Зараз більш реалістичні варіанти – металокерамічні наплавки, згадані вище, та 3D-друк зносостійкими матеріалами (наприклад, друк карбідних вставок).

Практичний ефект від заходів підвищення зносостійкості. Правильно поєднуючи методи, можна досягти значного збільшення ресурсу. Скажімо, леміш, виготовлений з хорошої бористої сталі, індукційно зміцнений по крайці і додатково наплавлений твердосплавним валиком на носку, здатен зорати у 3–4 рази більшу площу до затуплення, ніж звичайний. Диски з плазмовим напиленням карбідним покриттям демонструють знос менший на 30–50% після однакової роботи, порівняно з безпокриттєвими. Застосування оборотних лап майже вдвічі скорочує витрати на запасні частини, адже заміна йде рідше.

Однак треба зазначити, що будь-яке підвищення зносостійкості – це завжди компроміс із економікою і технологічністю. Надтверді матеріали дорогі та важко обробляються, наплавлення потребує часу і грошей, ускладнення конструкції – це додаткове обслуговування і вага. Тому інженери шукають оптимальний баланс для кожного випадку. Наприклад, для дрібних фермерських господарств може бути вигідніше мати дешеві деталі і просто часто їх міняти, ніж інвестувати в дорогі надміцні, які «вічні». А великі агрохолдинги, навпаки, зацікавлені у максимальному ресурсі, щоб зменшити простій техніки – для них оправдані дорогі рішення на кшталт імпортних зносостійких деталей.

У підсумку, сучасні технічні підходи дозволяють у багатьох випадках якщо не перемогти, то значно стримати абразивний знос. Комбінування матеріалознавчих методів (сталей, термообробок, покриттів) з раціональною

конструкцією і експлуатацією дає змогу суттєво продовжити життя робочих органів ґрунтообробної техніки. Розробка нових способів захисту від зносу триває – з'являються нові сплави, плакування (наплавлення порошкових стрічок), адитивні технології виготовлення деталей з внутрішньою градієнтною твердістю тощо. Все це має на меті підвищити зносостійкість, а значить – продуктивність і економічність сільськогосподарських машин.

Абразивне зношування є основним видом руйнування робочих органів ґрунтообробних машин, невід'ємним супутником процесу обробітку ґрунту. Результати проведеного аналізу механізмів і факторів цього зношування дозволяють зробити такі узагальнення:

Механізм абразивного зносу. В основі абразивного зношування лежить мікрорізання та мікро-пластична деформація металу твердими ґрунтовими частинками. Тертя металу об ґрунт має переважно механічний характер: тверді зерна (пісок, камінці) дряпають і зрізають матеріал робочого органа. Розрізняють зношування за схемою двох тіл (фіксованим абразивом) і трьох тіл (вільним абразивом); у ґрунті зазвичай реалізується комбінація обох механізмів. На мікрорівні абразив спричиняє утворення борозен (подряпин), гребінців деформованого металу та іноді мікротріщин. Швидкість зносу залежить від властивостей абразиву (твердості, розміру, форми зерен) і від твердості та структури матеріалу деталі.

Особливості різних типів робочих органів. Кожен тип ґрунтообробного робочого органа має свій характер зношування, обумовлений формою та режимом роботи:

Лемеші плугів швидко втрачають ріжучу крайку і носок через абразивне різання; їх поверхні поліруються ґрунтом. Зношений леміш тупиться і вимагає заточування або заміни.

Лапи культиваторів сточуються на передньому краї, зменшуючи ширину захвату; тупа лапа гірше підрізає бур'яни. Часто лапи роблять оборотними або змінними для продовження ресурсу.

Долота глибокорозпушувачів зношуються на вістрі, яке швидко округлюється, що знижує здатність проникати в ґрунт; необхідна регулярна заміна наконечників.

Ножі ротаційних фрез відчують одночасно абразивне сточування лез і ударні сколи від каміння; знос проявляється у затупленні і укороченні ножів, що погіршує дроблення ґрунту.

Дискові робочі органи (диски борін, плугів, сошники) поступово зменшуються в діаметрі; їх кромки тупляться. Особливість дисків – часткове котіння, тому знос розподіляється більш рівномірно по окружності, хоча й концентрується на периферії диска.

Вплив умов експлуатації. Інтенсивність зношування значно варіює залежно від зовнішніх факторів:

Абразивність ґрунту визначається вмістом твердих часток (піску, каменю): піщані ґрунти зношують деталі багато швидше, ніж глинисті.

Вологість ґрунту діє як “природне мастило”: у сухому полі знос найвищий, у зволоженому – помітно менший через зниження тертя і зв'язування пилу.

Підвищення швидкості руху та глибини обробітку веде до зростання зносу, оскільки збільшується енергія тертя і контактний тиск.

Наявність каміння та перешкод у ґрунті спричиняє ударно-абразивний знос, що може призводити до сколів і тріщин у матеріалі.

Неправильне налаштування кутів, форм і стану робочих органів (заточка, шорсткість) може збільшувати непотрібне тертя і прискорювати знос.

Корозійні фактори (волога, добрива) під час зберігання і роботи також впливають: корозія послаблює поверхню, прискорюючи її стирання.

Для боротьби з абразивним зношуванням застосовується комплекс матеріалознавчих і конструктивних заходів:

Використання високовуглецевих і легованих сталей, що після загартування набувають високої твердості (бористі сталі для дисків, ресорні сталі для лап тощо).

Термічна обробка: об'ємне гартування, індукційне зміцнення крайок, цементация і азотування створюють тверду зносостійку поверхню.

Нанесення твердих шарів: наплавлення електродами або дротом з карбідами, плазмове та термічне напилення надтвердих матеріалів (карбіди, оксиди) суттєво знижують швидкість зносу.

Інженерні рішення в конструкції: самозагострювальні леза (різна твердість шарів), змінні наконечники і оборотні деталі, захисні накладки на зношуваних ділянках, а також амортизатори проти ударів – усе це дозволяє продовжити строк служби робочих органів.

Оптимізація форми та режимів роботи: правильний кут атаки, гладка поверхня, мінімізація налипання ґрунту – допомагають зменшити абразивне навантаження на деталь.

Загальний висновок полягає в тому, що глибоке розуміння трибологічних аспектів абразивного зношування є необхідною передумовою для підвищення надійності та довговічності ґрунтообробних машин. Врахування механізмів зносу та впливу експлуатаційних факторів ще на стадії проектування дозволяє обирати матеріали і конструкцію, що максимально протистоять зношуванню. Вже діючі технічні рішення – загартовані та наплавлені деталі, нові покриття, вдосконалені форми – демонструють значний прогрес у збільшенні ресурсу робочих органів. Надалі впровадження сучасних технологій матеріалознавства і інженерних інновацій (плазмові покриття, композиційні матеріали, 3D-друк зносостійких структур) відкриває можливості ще більшого зниження темпів зносу. Це, у свою чергу, сприяє ресурсозбереженню, економії коштів на запчастини та підвищенню ефективності агротехнічних операцій. Таким чином, боротьба з абразивним зношуванням робочих органів ґрунтообробних машин –

важлива складова розвитку сучасної агроінженерії, що забезпечує надійність і продуктивність сільськогосподарської техніки.

1.2 Особливості зношування та підвищення зносостійкості дискових робочих органів ґрунтообробних машин

Дискові ґрунтообробні агрегати займають помітне місце у структурі машинно-тракторного парку агропідприємств України. За оцінками, наведеними в джерелі [1], частка дискових знарядь у загальній кількості ґрунтообробних машин сягає приблизно 40%, а результативність обробітку істотно визначається геометричними параметрами диска [1]. У процесі роботи початкові (паспортні) розміри дисків неминуче змінюються через абразивні та ударні впливи ґрунтового середовища. Це веде до погіршення агротехнічної якості операції та зростання енергетичних витрат. Так, шестирічні експлуатаційні випробування агрегату ДЛ-2,5 засвідчили, що зменшення розмірів передніх дисків становило 21,1 мм (що відповідає 60,2% виробленого ресурсу), тоді як задні диски зносилися на 11,5 мм (32,8% ресурсу); при цьому прогнозований залишковий ресурс оцінено лише у 39,8% і 67,2% відповідно [4]. Подібні зміни спричиняють вимушене зниження робочої швидкості, нестабільність заглиблення, підвищення тягового опору та необхідність частих замін або відновлювальних робіт. Загалом елементи, що працюють у режимі інтенсивного абразивного впливу (включно з дисковими робочими органами), формують понад половину всіх відмов сільськогосподарської техніки [5]. Отже, зношування дисків слід розглядати як одну з ключових проблем, що потребує аналізу причинно-наслідкових зв'язків і пошуку ефективних шляхів мінімізації.

Низка досліджень [2, 6, 7] підкреслює, що контакт «ґрунт – дисковий робочий орган» є надзвичайно складним у трибологічному сенсі. Реальне підвищення довговічності та опору спрацюванню дисків можливе лише за умови детального розуміння закономірностей їх зношування. Під час функціонування

дискові елементи працюють у середовищі з високою абразивністю, унаслідок чого зазнають інтенсивного руйнування поверхневого шару. У зоні тертя одночасно розгортається сукупність механічних, фізичних та хімічних явищ, а характер їхньої взаємодії та співвідношення швидкостей визначають домінівний тип і специфіку проявів абразивного зношування.

Традиційно абразивне зношування поділяють на два базові різновиди: із участю закріплених абразивних частинок (*two-body abrasive wear*) та із участю вільних частинок (*three-body abrasive wear*) [47, 48]. У першому випадку тверді включення діють як «мікроінструмент», що ковзає по поверхні й формує характерні борозни (*grooving abrasion*). У другому – абразивні зерна не фіксуються, а переміщуються між двома поверхнями, що рухаються відносно одна одної, реалізуючи переважно режим перекочування (*rolling abrasion*). Окремо вказують на так зване «закрите» абразивне зношування (*closed abrasion*), яке протиставляють «відкритому» (*open abrasion*), коли потік незакріпленого абразиву рухається вздовж твердої поверхні. Разом із тим, як зазначають окремі автори [2, 8], наведена схема поділу не відображає всього різноманіття проявів абразивного процесу й у певних випадках може трактуватися як недостатньо повна.

Зокрема, в роботі [2] наголошується, що спрацювання робочих поверхонь ґрунтообробних машин формується одночасною взаємодією з абразивом різного «ступеня фіксації»: закріпленим, незакріпленим і так званим напівзакріпленим. Наявність на робочих органах дискових машин характерних ділянок із різними слідами тертя та морфологією пошкоджень (рис. 1.1) розглядається як ознака паралельного протікання кількох механізмів зношування на одній і тій самій поверхні.

Як видно з рис. 1.1, при роботі на піщаних ґрунтах поверхня зазнає значно інтенсивнішого мікрорізального впливу, що проявляється у вигляді чітко окреслених борозен і слідів різання, порівняно з поверхнею, яка формувалася під час експлуатації в глинистих ґрунтах. Водночас на обох зразках фіксуються

каверни та локальні пошкодження, наявність яких свідчить про дію ударно-абразивного механізму зношування незалежно від типу ґрунтового середовища.



б)



б)

Рис. 1.1. Характер поверхні тертя: а) спрацювання в умовах піщаних ґрунтів; б) спрацювання в умовах глинистих ґрунтів.

Результати попередніх наукових досліджень показують, що головною причиною втрати працездатності робочих органів ґрунтообробних машин є їх лінійне та масове спрацювання [2, 9]. У зв'язку з цим вирішального значення набувають чинники, які визначають швидкість і характер абразивного руйнування робочих поверхонь у процесі експлуатації.

Для ідентифікації та оцінювання таких чинників необхідно детально розглянути властивості елементів трибосистеми «робочий орган – ґрунт» [2]. Практика показує, що робочі органи ґрунтообробних машин переважно виготовляють зі сталей, тоді як застосування чавунів або інших сплавів має, як правило, експериментальний характер і використовується в обмежених обсягах.

У промислово розвинених країнах упродовж останніх десятиліть домінує використання низьколегованих сталей для виготовлення ґрунтообробних робочих органів, насамперед борвмісних і вуглецевих сталей з вмістом вуглецю в межах 0,4–0,7 % [10–16]. Такий вибір матеріалів зумовлений поєднанням достатньої зносостійкості, технологічності та економічної доцільності.

Підвищення довговічності й опору спрацюванню робочих органів ґрунтообробних машин є одним із пріоритетних завдань сучасного машинобудування та раціональної експлуатації агротехніки. Актуальність цієї

проблеми визначається не лише необхідністю скорочення витрат матеріальних ресурсів, а й прагненням зменшити витрати на технічне обслуговування, а також знизити втрати робочого часу, пов'язані з простоем машин під час заміни зношених елементів.

На основі численних досліджень встановлено, що подовження ресурсу та підвищення зносостійкості деталей і робочих органів машин досягається реалізацією трьох взаємодоповнювальних підходів: технологічного, конструкційного та експлуатаційного (рис. 1.2) [2].

Незважаючи на значну кількість наукових робіт, присвячених проблемі підвищення довговічності дискових ґрунтообробних машин, низка питань, пов'язаних із механізмами їх зношування та оптимізацією шляхів підвищення ресурсу, і дотепер залишається недостатньо дослідженою.

У межах експлуатаційних заходів, спрямованих на збільшення строку служби та опору спрацюванню робочих органів ґрунтообробної техніки, провідне місце займає раціональний добір і коригування режимів їх функціонування. Оптимізація параметрів роботи дозволяє зменшити інтенсивність абразивного впливу, знизити контактні навантаження та уповільнити руйнування робочих поверхонь без внесення конструктивних змін у машину.

У низці наукових праць [2, 17] запропоновано підходи, що передбачають коригування геометрії робочих органів ґрунтообробних машин з метою подовження їх експлуатаційного ресурсу. Однак переважна частина таких конструктивних рішень не знайшла широкого впровадження у серійному виробництві. У зв'язку з цим під час розроблення заходів, спрямованих на підвищення довговічності та опору спрацюванню, доцільно спиратися на геометричні параметри стандартних, промислово виготовлених деталей. Фактично єдиним параметром, який може бути відносно просто скоригований безпосередньо в умовах сільськогосподарських підприємств, залишається кут загострення робочої частини.



Рис. 1.2. Способи підвищення ресурсу дискових робочих органів ґрунтообробних машин [2].

Проблематика підвищення зносостійкості деталей і робочих органів машин, що експлуатуються в абразивному середовищі, традиційно викликає найбільший інтерес у площині технологічних рішень. Значна кількість досліджень зосереджена на обґрунтуванні раціональних режимів обробки матеріалів, а також на пошуку ефективних способів поверхневого зміцнення та виборі матеріалів, здатних протистояти інтенсивному абразивному впливу.

На сучасному етапі використовується різноманітний арсенал технологічних методів, спрямованих на підвищення зносостійкості та

збільшення строку служби робочих органів ґрунтообробних машин, що підтверджує актуальність і практичну значущість цього напрямку.

Для аграрних підприємств України особливо привабливим є спосіб підвищення ресурсу дискових робочих органів шляхом ручного електродугового наплавлення зносостійких шарів. Популярність цього методу пояснюється сукупністю його переваг: високою опірністю наплавленого шару до стирання; можливістю локального відновлення зношених ділянок; доступністю обладнання та матеріалів; відносною простотою реалізації; гнучкістю технологічного процесу; широким асортиментом електродів; здатністю збільшувати ресурс деталей у 1,5–3 рази і більше; сумісністю з іншими методами зміцнення; а також економічною доцільністю впровадження.

Водночас, попри очевидні переваги ручного електродугового наплавлення, питання ефективності підвищення зносостійкості дискових робочих органів ґрунтообробних машин за умови поєднання цього методу з реалізацією ефекту самозагострювання залишається недостатньо вивченим і потребує подальших досліджень.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідні роботи, представлені у даному дослідженні, проводилися з використанням як загальноприйнятих стандартних, так і спеціально розроблених методик.

Хімічний склад наплавлених шарів встановлювали методом атомно-емісійної спектроскопії, що забезпечує достовірне визначення вмісту основних та легувальних елементів у поверхневому шарі.

Оцінювання твердості наплавленого шару здійснювали за допомогою портативного твердоміра Т-УД2. Вимірювання проводили відповідно до вимог стандарту ASTM A1038, який є доцільним для аналізу зміцнених поверхневих шарів, оскільки глибина проникнення індентора за цією методикою, як правило, знаходиться в межах 30–50 мкм.



Рис. 2.1. Портативний твердомір Т-УД2.

З метою максимально наблизити лабораторні умови до реальних режимів зношування дискових робочих органів ґрунтообробних машин під час випробувань зразків на зносостійкість застосовували метод так званої «крильчатки» (рис. 2.2). Величину масової втрати зразків визначали з використанням лабораторних терезів типу СР 34001 S. Дослідні зразки виготовляли зі сталі 65Г.

До незмінних (контрольованих) параметрів експерименту відносили швидкість відносного руху, що становила 125,28 м/хв, а також тиск абразивного середовища на поверхню зразка, який підтримували на рівні 122,6 кПа. Як абразивне робоче середовище використовували кварцовий пісок із розміром частинок у межах 50...100 мкм, при цьому коефіцієнт форми абразивних зерен дорівнював $K_{\phi} = 114,18$.



а)



б)

Рис. 2.2. Експериментальна установка для оцінювання зносостійкості наплавленого покриття: а – загальний вигляд станда; б – вал для фіксації дослідних зразків.

Експлуатаційні випробування дисків зі зміцненим наплавленим шаром, а також серійних (базових) дисків здійснювали на дисковій бороні БДВП-7,2 (рис. 2.2) у виробничих умовах господарств Коростенського району Житомирської області впродовж 2024–2025 років.



Рис. 2.3. Проведення експлуатаційних випробувань зміцнених і серійних робочих органів, встановлених на дисковій бороні БДВП-7,2.

Дослідні роботи виконували на вирізних сферичних дисках номінальним діаметром 655 мм (рис. 2.4). Критерієм вибракування вважали досягнення граничного зношеного стану, який для дисків цього типу, згідно з даними роботи [7], відповідає зменшенню діаметра до 546 мм. Матеріалом виготовлення дослідних дисків була сталь 65Г.

Зміцнення робочих поверхонь здійснювали з використанням електродів марок ESAB OK 84.78 (OK Weartrode 60 T), UTR DUR 600, T-590 та T-620. Загалом було виготовлено 16 експериментальних дисків, які монтували у першому ряду дискової борони з випадковим порядком розташування. Нанесення зносостійких наплавлених шарів виконували на дискові робочі органи зі сталі 65Г (рис. 2.4).

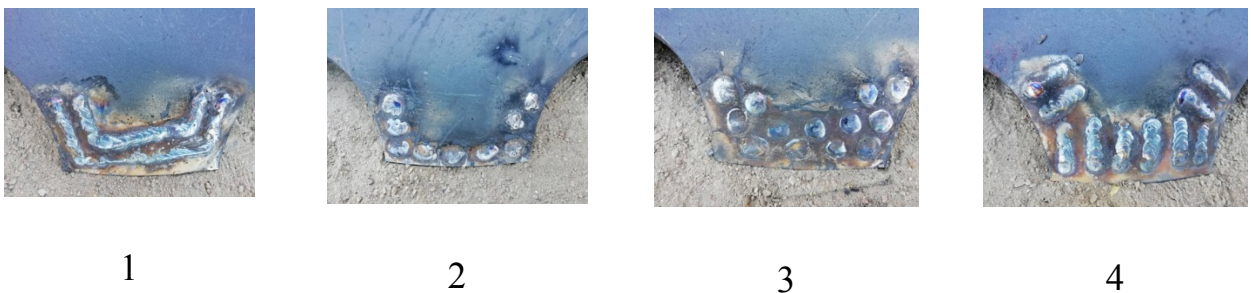


Рис. 2.4. Схеми нанесення зносостійких наплавлених покриттів на дискові робочі органи.

Результати лабораторних і експлуатаційних випробувань опрацьовували із застосуванням методів математичної статистики.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЛАБОРАТОРНИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Під час виконання лабораторних і експлуатаційних випробувань наплавлення зносостійких шарів здійснювали з дотриманням технологічних режимів, рекомендованих виробниками відповідних зварювальних матеріалів. Дані щодо хімічного складу сформованих зносостійких покриттів наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад наплавленого металу (масова частка елементів, %).

Марка електроду	C	Mn	Si	Cr	S	P	B	Ti
T-590	3,33	1,24	2,42	23,42	0,022	0,023	0,87	-
T-620	3,39	1,32	2,48	22,84	0,022	0,021	1,22	1,35
ESAB OK 84.78 (OK Weartrode 60 T)	3,55	1,48	1,06	34,51	<0,01	<0,01	-	-
UTR DUR 600	0,52	0,4	2,31	9,0	<0,01	0,02	-	-

Хімічний склад сформованого зносостійкого шару узгоджується з характеристиками, задекларованими виробниками наплавочних електродів. Водночас сам по собі склад покриття не дає змоги повною мірою охарактеризувати його триботехнічні властивості, оскільки для об'єктивної оцінки необхідно визначити показники твердості та зносостійкості.

Результати вимірювання твердості зносостійких наплавлених шарів, нанесених на дослідні зразки зі сталі 65Г, наведено на рис. 3.1.

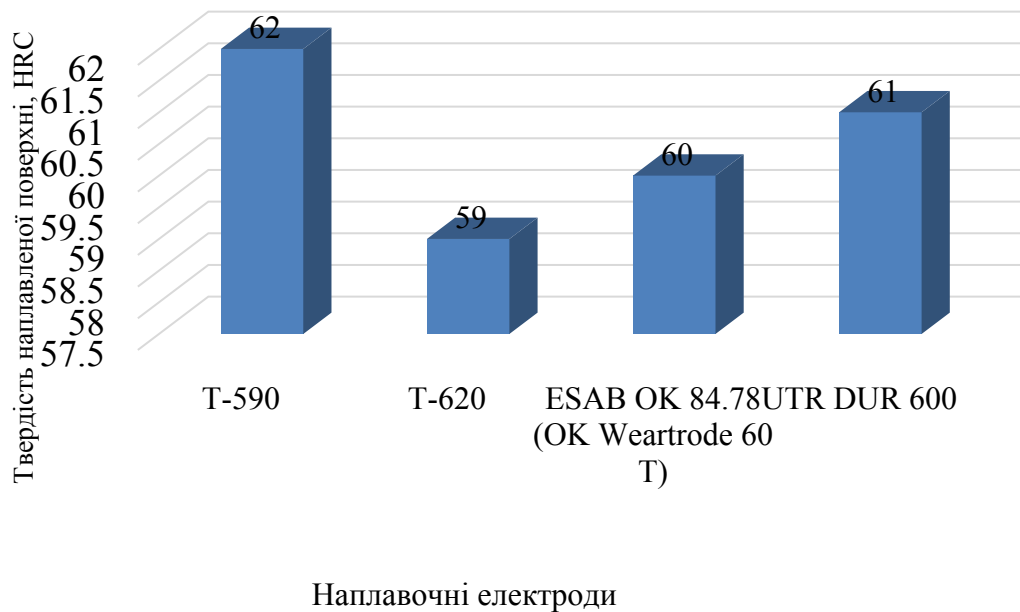


Рис. 3.1. Значення твердості наплавленого зносостійкого шару.

У результаті нанесення зносостійкого покриття методом ручного електродугового наплавлення твердість робочої поверхні, що зазнає абразивного впливу, істотно зросла та знаходиться в межах 59–62 HRC. Водночас у численних дослідженнях наголошується, що показник твердості сам по собі не може слугувати вичерпною характеристикою зносостійкості матеріалу. Зносостійкість є інтегральною властивістю, яка формується під впливом сукупності чинників, зокрема твердості, хімічного складу та мікроструктури покриття. З огляду на це, для об'єктивного оцінювання ефективності наплавленого шару доцільно визначати його зносостійкість як у лабораторних умовах, так і під час експлуатаційних випробувань. Слід також зазначити, що за умов ударно-абразивного зношування надмірне підвищення твердості поверхні тертя може мати негативний ефект і призводити до зниження її опору спрацюванню.

З метою визначення зносостійкості сформованого покриття було виконано комплекс лабораторних досліджень відповідно до наведеної методики. Результати цих випробувань подано на рис. 3.2.

Порівняльний аналіз отриманих даних щодо твердості наплавленого шару (рис. 3.1) та інтенсивності його зношування (рис. 3.2) свідчить про відсутність прямої пропорційної залежності між твердістю поверхні та її зносостійкістю. Таку особливість можна пояснити відмінностями у хімічному складі наплавлених шарів (табл. 3.2) та їх структурній організації. Крім того, зносостійкість наплавленого покриття в реальних умовах експлуатації може істотно відрізнятися від лабораторних результатів, що обумовлено впливом додаткових факторів, зокрема наявністю кам'янистих включень, рослинних решток, вологості ґрунту та інших чинників, які змінюють інтенсивність процесів зношування.

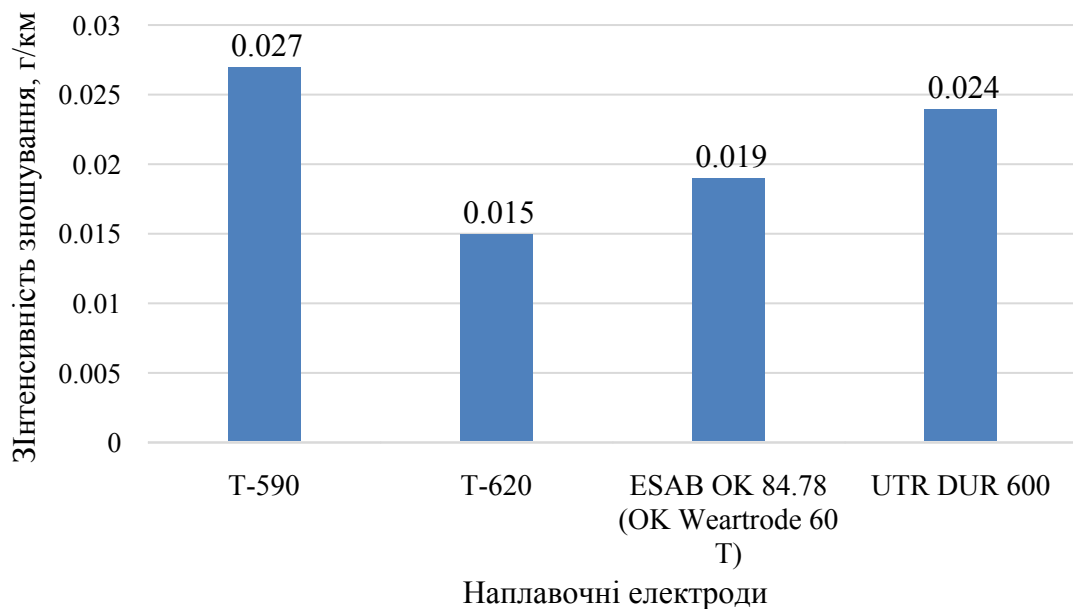


Рис. 3.2. Залежність інтенсивності масового зношування дослідних зразків зі сталі 65Г від матеріалу наплавленого зносостійкого шару.

За результатами проведених досліджень встановлено, що різні варіанти нанесення зносостійкого покриття на дискові робочі органи ґрунтообробних машин (рис. 2.5) не чинять вирішального впливу на їх експлуатаційну довговічність. Відмінності між отриманими показниками перебувають у межах статистичної похибки та не перевищують 2,5 %. Разом з тим, підвищену інтенсивність спрацювання продемонстрував зразок 2 (рис. 2.5), що пояснюється

значно меншим об'ємом нанесеного зносостійкого шару порівняно з іншими дослідними дисковими робочими органами.

Водночас ключовим чинником, який визначає рівень зносостійкості, є матеріал, використаний для формування наплавленого зносостійкого покриття на поверхні дискових робочих органів ґрунтообробних машин (рис. 3.3).

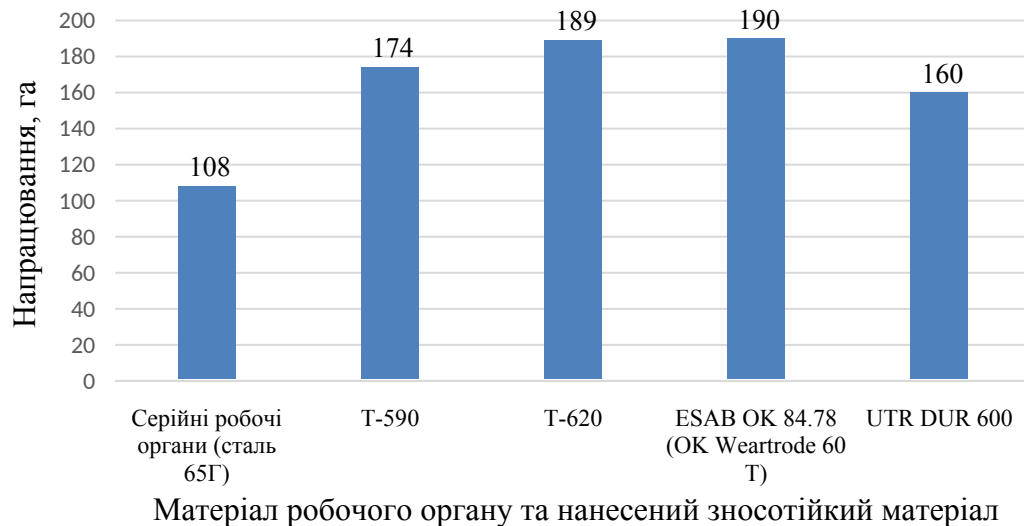


Рис. 3.3. Напрацювання дискових робочих органів ґрунтообробних машин до досягнення граничного стану.

Застосування зносостійких матеріалів методом ручного електродугового наплавлення забезпечує помітне збільшення строку служби дискових робочих органів ґрунтообробних машин порівняно з серійними деталями. Зокрема, наплавлення електродами T-590 дозволяє підвищити довговічність дисків, виготовлених зі сталі 65Г, на 61%, електродами T-620 – на 75%, ESAB OK 84.78 (OK Weartrode 60 T) – також на 75%, а застосування електродів UTR DUR 600 забезпечує зростання ресурсу на 48%.

Обмежений ресурс серійних дискових робочих органів зумовлений переважанням найбільш інтенсивного та несприятливого механізму абразивного спрацювання – мікрорізання – на поверхні тертя. Характерні сліди цього процесу чітко фіксуються на ріжучій крайці серійних дисків (рис. 3.4). Водночас на кромках робочих органів, зміцнених наплавленими шарами, ознаки мікрорізання практично не виявляються. Такий ефект пояснюється істотним зростанням

твердості поверхні тертя, що перешкоджає проникненню абразивних частинок у матеріал диска та унеможливорює процес зняття металевої стружки з робочої поверхні дискових ґрунтообробних машин.



Рис. 3.4. Характер поверхні зношування серійних робочих органів.

Контроль змін геометрії ріжучої кромки в процесі експлуатації виконували шляхом отримання відбитків профілю леза робочого органу дискових ґрунтообробних машин, що дало змогу простежити еволюцію форми кромки у міру зношування (рис. 3.5).



Рис. 3.5. Загальний вигляд поперечного перерізу відбитка ріжучої кромки дискового робочого органу.

Аналіз поперечних перерізів відбитків ріжучих кромок показав, що для всіх дискових робочих органів, зміцнених методом ручного електродугового наплавлення, характерною є поява та стійкий прояв ефекту самозагострювання. Зазначений ефект реалізується за рахунок вибіркового зношування матеріалу основи, внаслідок чого наплавлений твердий шар поступово виступає над поверхнею і формує активну ріжучу кромку. Такий механізм дозволяє зберігати робочі властивості леза протягом тривалого періоду експлуатації без додаткового підточування.

Для більшості досліджених варіантів зміцнення, за винятком варіанта 1 (рис. 2.5), у процесі зношування формувалася характерна пилоподібна (зубчастохвиляста) форма кромки. Утворення такої геометрії має позитивний вплив на виконання технологічної операції, оскільки сприяє більш ефективному різанню ґрунту, зменшенню зони тертя та, як наслідок, зниженню тягового опору ґрунтообробного агрегату.

Експериментально підтверджено, що зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин ручним електродуговим наплавленням за запропонованими схемами забезпечує стабільну реалізацію ефекту самозагострювання протягом усього строку їх експлуатації. Проведені порівняльні дослідження засвідчили, що кут загострення ріжучих елементів зміцнених дискових робочих органів є меншим, ніж у серійних аналогів, у середньому до 13 %, що безпосередньо впливає на покращення різальних властивостей і зменшення енерговитрат під час обробітку ґрунту.

Реалізація ефекту самоорганізації ріжучої кромки (самозагострювання) шляхом нанесення зносостійкого наплавленого шару зумовила не лише зростання ресурсу дискових робочих органів, але й відчутне зниження витрат пального під час експлуатації ґрунтообробної техніки порівняно зі стандартними серійними дисками. Це пояснюється стабільним збереженням гостроти кромки, зменшенням опору різанню та зниженням втрат енергії на подолання тертя.

Разом із тим, у ході експлуатаційних досліджень було зафіксовано й негативне явище, а саме локальне обломлювання виступаючого твердого шару при роботі ґрунтообробного агрегату на ґрунтах із підвищеним вмістом кам'янистих включень. У таких умовах ударні навантаження спричиняють крихке руйнування наплавленого шару. Водночас на ґрунтах, де кам'яністі включення відсутні або їх кількість є незначною, випадків обломлювання ріжучої кромки дискових робочих органів не виявлено.

Загалом процес зношування дискових робочих органів ґрунтообробних машин має складний і багатофакторний характер. Інтенсивність та механізм абразивного спрацювання можуть істотно відрізнятися на різних ділянках робочої поверхні, супроводжуватися додатковими механічними та фізико-хімічними явищами, а в окремих експлуатаційних ситуаціях переходити в режим ударно-абразивного руйнування. З огляду на це, завдання підвищення зносостійкості та довговічності робочих органів, що працюють у безпосередньому контакті з ґрунтом, не може бути вирішене виключно за рахунок застосування окремих технологічних методів зміцнення, а потребує комплексного підходу з урахуванням умов експлуатації.

Висновки до розділу

На основі отриманих експериментальних результатів, а також з урахуванням вартості й доступності наплавочних матеріалів встановлено, що найбільш доцільним способом підвищення довговічності робочих органів дискових ґрунтообробних машин є нанесення зносостійкого шару методом ручного електродугового наплавлення електродом Т-620 за схемами варіантів 3 та 4 (рис. 2.5). Саме ці варіанти забезпечують оптимальне поєднання підвищеної зносостійкості, стабільного ефекту самозагострювання та технологічної простоти реалізації.

Експлуатацію зміцнених дискових робочих органів, виготовлених із застосуванням ручного електродугового наплавлення, доцільно здійснювати на ґрунтах, що не містять кам'янистих включень, де ризик крихкого руйнування наплавленого шару є мінімальним і забезпечується максимальний приріст ресурсу в порівнянні з серійними аналогами.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На основі детального аналізу конструктивних особливостей дискових робочих органів та умов їх експлуатації встановлено, що процес їх зношування не є однорідним або лінійним, а має складний, комплексний характер. Формування зносу відбувається під одночасною дією кількох взаємопов'язаних факторів, серед яких визначальну роль відіграють абразивні властивості ґрунтового середовища, наявність ударних навантажень при контакті з твердими включеннями, а також змінні та коливальні рухи робочих органів у процесі взаємодії з ґрунтом. Поєднання цих чинників зумовлює нерівномірність спрацювання різних ділянок диска, зміну геометрії ріжучої кромки та поступове погіршення агротехнічних показників обробітку ґрунту.

У межах виконаних досліджень ґрунтовно вивчено триботехнічні характеристики наплавлених поверхневих шарів, сформованих методом ручного електродугового наплавлення з використанням різних електродних матеріалів. Експериментально підтверджено, що нанесення зносостійких покриттів призводить до істотного підвищення твердості робочої поверхні та супроводжується помітним зменшенням інтенсивності масового зношування в умовах лабораторних випробувань. Водночас встановлено, що ефективність наплавленого шару визначається не лише абсолютним значенням твердості, а й його структурним станом, характером розподілу твердих фаз і здатністю матеріалу адаптуватися до умов абразивно-ударного навантаження.

Результати польових експериментальних досліджень дискових робочих органів із наплавленими зносостійкими шарами підтвердили практичну доцільність застосування ручного електродугового наплавлення як ефективного способу підвищення їх експлуатаційного ресурсу. У реальних умовах роботи ґрунтообробних агрегатів зафіксовано зростання довговічності наплавлених дисків у порівнянні з серійними аналогами в межах 48...75 %, що свідчить про

високий потенціал даного технологічного підходу для використання в аграрному виробництві.

Особливу увагу в процесі експлуатаційних випробувань приділено дослідженню ефекту самозагострювання ріжучих кромek. Встановлено, що сформовані наплавлені шари забезпечують керований характер зношування, за якого більш м'які ділянки основного матеріалу спрацьовуються інтенсивніше, тоді як виступи зміцненого наплавленого шару зберігають свою форму і функціональність. Така особливість дозволяє підтримувати менший кут загострення ріжучої кромки протягом усього строку служби дискового робочого органу без необхідності додаткового підточування. Збереження оптимальної геометрії леза позитивно впливає на умови різання ґрунту, сприяє зменшенню тягового опору ґрунтообробного агрегату та забезпечує економію пального під час виконання технологічних операцій.

Порівняльний аналіз серійних і наплавлених дискових робочих органів показав, що впроваджені технологічні рішення дозволили знизити кут загострення ріжучих крайок упродовж експлуатаційного періоду до 13 %, що є суттєвим показником з точки зору підвищення енергоефективності та стабільності роботи ґрунтообробної техніки. Отримані результати підтверджують доцільність комплексного підходу до підвищення зносостійкості дискових робочих органів, який поєднує раціональний вибір матеріалів, технологій зміцнення та врахування реальних умов їх експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Герук С.М., Бора́к К.В. Методика експлуатаційних досліджень зношування робочих органів дискових ґрунтообробних знарядь. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* Кіровоград: КНТУ, 2009. Вип. 39. С. 392-396.
2. Бора́к К. В. Комплексний підхід підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.05.11 / Поліський національний університет, м. Житомир. 2021. 380.
3. Денисенко М.І. Відновлення та зміцнення деталей і робочих органів сільськогосподарських машин, працюючих в абразивному середовищі. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин.* 2023. Вип. 53. С. 271-284.
4. Халін С., Шустік Л., Степченко С., Сидоренко С., Гайдай Т. Дослідження зносу дисків агрегата ґрунтообробного ДЛ-2,5 за час випробувань в умовах дослідної експлуатації. *Сільськогосподарська техніка та обладнання: прогнозування, конструювання, випробування.* Випуск 32 (46). С. 74-83. URL: [dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2023-1-32\(46\)-6](https://doi.org/10.31473/2305-5987-2023-1-32(46)-6).
5. Wang Y., Li D., Nie Ch., Gong P., Yang J., Hu Zh., Li B., Ma M. Research Progress on the Wear Resistance of Key Components in Agricultural Machinery. *Materials (Basel)*. 2023 Dec 14;16(24):7646. doi: 10.3390/ma16247646.
6. Cardei P., Vladutoiu L. C., Gheorghe G., Fechete T.L.V., Chisuiu G. Multidisciplinary Investigations Regarding the Wear of Machine Tools Operating Into the Soil. *9th International Conference on Tribology (Balkantrib'17). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 295 (2018). 012007. URL: [doi:10.1088/1757-899X/295/1/012007](https://doi.org/10.1088/1757-899X/295/1/012007).
7. Бора́к К. В. Підвищення зносостійкості робочих органів дискових ґрунтообробних знарядь методом електроерозійної обробки : дис. ... канд. тех.

наук : 05.02.04 / Житомирський національний агроекологічний університет. Житомир, 2013. 217 с.

8. Аулін В. В. Напружено-деформований стан ґрунту при його взаємодії з різальними елементами робочих органів ґрунтообробних машин. *Науковий вісник Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*. 2010. №3. С. 6–17.

9. Аулін В. В., Бобрицький В. М., Солових Є. К. Аналіз характеру зношування лез ґрунторіжучих деталей та підвищення їх ресурсу лазерними технологіями. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2005. Вип. 35. С. 153–157.

10. Kalacska A., Baets P., Fauconnier D., Schramm F., Frerichs L., Sukumaran J. Abrasive wear behaviour of 27MnB5 steel used in agricultural tines. *Wear*. 2020. Vol. 442-443. URL : <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203107> (Last accessed : 04.02.2019).

11. Dizdar S., Maroli B. Abrasive wear resistance of thermal surfacing materials for soil tillage applications. *International Thermal Spray Conference and Exposition: Innovative Coating Solutions for the Global Economy, ITSC 2013*. Busan, South Korea. URL : https://www.hoganas.com/globalassets/download-media/technical-papers/sco/t5_eng_abrasive_wear_resistance_of_thermally_surfaced_materials_for_soil_tillage_applications.pdf (Last accessed : 04.02.2019).

12. Lemecha M., Napiórkowski J., Ligierf K. Forecasting the Wearing of Ploughshares Parts Under Operating Conditions. *Tribologia*. 2019. №4 p. 33–39. DOI: 10.5604/01.3001.0013.5963

13. Pérez G., González H., Toro A. Desgaste abrasivo de cuchillas de arado rotativo en un suelo franco arenoso. *DYNA*. 2010. Vol. 77, Núm. 162. p. 105–114.

14. Graff L., Roberge R., Crowe T. Wear of Ripper Point Hardsurfacing. *ASABE Section Meeting Presentation*. 2007. P. 2–10.

15. Miller A. E. Wear in tillage tools. *Wear Control Handbook*. 1980. p. 987–998.
16. Horvat Z., Filipovic D. Kosutic S. Reduction of mouldboard plough share wear by a combination technique of hardfacing. *Tribology International*. 2008. 41. P. 778–782. URL : <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.01.008> (Last accessed : 04.02.2019).
17. Belousov S. V., Samurganov E. E., Rodionenko A. I. Theoretical justification of the type of a flat-cutting working body of a ploughshare. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 709. URL : <https://doi.org/10.1088/1757-899x/709/3/033100>.
18. Борак К. В. Impact of soil moisture on wear intensity of the actuating elements of soil processing machines. Міжнародний науковий журнал «Проблеми трибології». 2020. № 2. С 34–41.
19. 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.
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.
21. Rogovskii, I. L., Borak, K. V., Maksimovich, E. Yu., Smelik, V. A., Voinash, S. A., Maksimovich, K. Yu., & Sokolova, V. A. (2020). Wear resistance of blade and disc working bodies of tillage tilling machines hardened by electrodes. T-series. *Journal of Physics : Conference Series*. 1679 (4), art. №. 042084.
22. Борак К. В., Куликівський В. Л. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів. Ч. 1: Теоретичні основи матеріалознавства : навч. посіб. Житомир : Поліський нац. ун-т, 2024. 101 с.
23. Borak, K. V., Kulykivskyi V. L. Borovskiy V. M. Rudenko V. G., Dobranskiy S. S. Increasing the wear resistance of the working bodies of tillage machines by electrical discharge machining. Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка. Випуск 3 (48) 2025. Технічні науки. С.149-160.

24. K. V. Borak, V. L. Kulykivskyi; D. I. Rudnik. Impact of the preliminary corrosion on the intensity of the abrasive wear of the working tools of the tillage machine. Scientific Works of VNTU, 2023, № 2. DOI: <https://doi.org/10.31649/2307-5392-2023-2-33-42>

25. Dvoruk V.I., Borak K.V., Buchko I.O., Dobranskiy S.S. Destruction of Strain Hardened Steel Upon Abrasive Wear. Journal of Friction and Wear. 2021. Vol. 42 (3). P. 178-184

26. Borak K. Ensuring the equistability of the tillage tools wearout , Works of VNTU, no. 1, Feb. 2023. DOI: <https://doi.org/10.31649/2307-5392-2022-1-19-29>.

27 Байбула А, Халімовський С. Ковальчук Д. Триботехнічні процеси на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин. Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості: збірник матеріалів І Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Кам'янець-Подільський, 16 жовтня 2025 року). Кам'янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. С. 249-254

28. Деревянко Д.А., Байбула А.Ф., Ковальчук Д.С. Кушим Р.В. Аналіз умов роботи та зношування стрілочастих лап культиваторів. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. С. 116-121.

29. Ковальчук Д. С. Аналіз методів підвищення зносостійкості лемешів плугів. Покращення техніко-економічних показників тракторів під час виконання сільськогосподарських операції. Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково- педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 20-23.