

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

Факультет інженерії та енергетики  
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**Нагребецький Данило Володимирович**

**УДК 631.331:62-192**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ**  
**ПОСІВНИХ КОМПЛЕКСІВ**

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  
\_\_\_\_\_ Нагребецький Д.В.

**Керівник роботи**

Борак К.В.

доктор технічних наук, професор

**Житомир – 2025**

## АНОТАЦІЯ

**Нагребецький Данило Володимирович. Підвищення надійності робочих органів посівних комплексів.** – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

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

У роботі досліджено вплив матеріалу виготовлення робочих органів посівних комплексів, а також застосування зміцнюючих наплавлених покриттів на їх зносостійкість і експлуатаційну довговічність. Об'єктом дослідження обрано посівний комплекс Väderstad Rapid A 800 C, який широко використовується в сучасних технологіях сівби та працює в умовах інтенсивного абразивного навантаження.

У межах лабораторних досліджень визначали стійкість до абразивного зношування зразків, виготовлених зі сталі SSAB Boron 27, сталі 70Г, а також зразків зі сталі 70Г із нанесеними зносостійкими наплавленими покриттями, сформованими методом ручного дугового зварювання з використанням електродів марок ОК 84.78, ОК 84.80 та ОК 84.84. За результатами лабораторних випробувань встановлено, що найвищі показники зносостійкості демонструють зразки зі сталі 70Г з наплавленим зносостійким шаром, отриманим електродом ОК 84.80.

З метою перевірки достовірності отриманих лабораторних результатів та оцінки довговічності робочих органів у реальних умовах експлуатації проведено експлуатаційні випробування з визначення зносостійкості та ресурсу робочих органів посівного комплексу Väderstad Rapid A 800 C. Для кожного дослідного варіанта було виготовлено по п'ять робочих органів, які встановлювали на посівний комплекс та експлуатували у виробничих умовах восени 2019 року. Результати експлуатаційних випробувань повністю підтвердили висновки лабораторних досліджень щодо ефективності вибору матеріалів та зносостійких покриттів для забезпечення підвищеної довговічності робочих органів.

*Ключові слова: надійність, довговічність електродугове наплавлення, електрод, зносостійкість.*

## ANNOTATION

**Nahrebetskyi Danylo Volodymyrovych. Improving the Reliability of Working Bodies of Seeding Complexes.** – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

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

The study investigates the influence of the material used for manufacturing the working bodies of seeding complexes, as well as the application of reinforcing weld-deposited coatings, on their wear resistance and operational durability. The object of the research is the *Väderstad Rapid A 800 C* seeding complex, which is widely used in modern sowing technologies and operates under conditions of intensive abrasive loading.

Within the framework of laboratory investigations, the resistance to abrasive wear was determined for specimens manufactured from *SSAB Boron 27 steel*, *70G steel*, as well as for *70G steel* specimens with wear-resistant deposited coatings formed by manual arc welding using *OK 84.78*, *OK 84.80*, and *OK 84.84* electrodes. The laboratory test results revealed that the highest wear resistance was exhibited by specimens made of *70G steel* with a wear-resistant deposited layer applied using the *OK 84.80* electrode.

To verify the reliability of the laboratory results and to evaluate the durability of the working bodies under real operating conditions, field (operational) tests were carried out to determine the wear resistance and service life of the working bodies of the *Väderstad Rapid A 800 C* seeding complex. For each experimental variant, five working bodies were manufactured, installed on the seeding complex, and operated under production conditions in the autumn of 2019. The results of the field tests fully confirmed the conclusions of the laboratory studies regarding the effectiveness of the selected materials and wear-resistant coatings in ensuring increased durability of the working bodies.

Keywords: reliability, durability, arc welding deposition, electrode, wear resistance.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ, ОБҐРУНТУВАННЯ АКТУАЛЬНОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	9
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ, МЕТОДИ Й ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	33
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	40
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	51

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** Сучасний розвиток аграрного виробництва в Україні та світі характеризується зростанням масштабів посівних робіт, переходом до енергоощадних і ресурсозберігаючих технологій, а також широким упровадженням високопродуктивних посівних комплексів. Саме ці машини відіграють ключову роль у формуванні рівномірних і своєчасних сходів сільськогосподарських культур, а отже безпосередньо впливають на рівень урожайності та економічну ефективність рослинництва. За умов інтенсивної експлуатації посівних комплексів зростають вимоги до надійності та довговічності їх робочих органів, які працюють у складному абразивному середовищі ґрунту та зазнають значних механічних і динамічних навантажень.

Особливо актуальною проблема підвищення надійності робочих органів посівних комплексів є в умовах різноманіття ґрунтово-кліматичних зон, високої абразивності ґрунтів, наявності рослинних решток, а також використання технологій мінімального та нульового обробітку. Робочі органи посівних машин у таких умовах піддаються інтенсивному зношуванню, що призводить до зміни їх геометричних параметрів, погіршення якості загортання насіння, нерівномірної глибини висіву, зростання тягового опору та збільшення витрат пального. Як наслідок, знижується продуктивність посівних агрегатів, зростають простой через ремонти, підвищуються експлуатаційні витрати та погіршуються показники надійності машин у цілому.

В умовах обмежених фінансових ресурсів аграрних підприємств та ускладненого доступу до оригінальних запасних частин особливої ваги набувають питання подовження ресурсу робочих органів посівних комплексів, зменшення інтенсивності їх зношування та підвищення експлуатаційної надійності. Це потребує поглибленого вивчення закономірностей процесу зношування робочих органів під час їх взаємодії з ґрунтом, а також розроблення

технічних і технологічних рішень, спрямованих на підвищення зносостійкості та стабільності їх роботи протягом усього міжремонтного періоду.

З огляду на зазначене, дослідження процесу зношування робочих органів посівних комплексів під час взаємодії з ґрунтом та обґрунтування шляхів підвищення їх надійності є актуальним науково-практичним завданням. Результати такої роботи мають важливе значення для вдосконалення конструкцій робочих органів, вибору матеріалів і методів їх зміцнення, оптимізації режимів експлуатації та підвищення ефективності використання посівних комплексів у сучасних умовах аграрного виробництва.

Основною метою даної магістерської роботи є забезпечення підвищення експлуатаційної надійності посівних комплексів шляхом зменшення інтенсивності зношування їх робочих органів і стабілізації їхніх функціональних параметрів у процесі роботи. Досягнення **поставленої мети** передбачає удосконалення властивостей робочих поверхонь, що безпосередньо взаємодіють із ґрунтовим середовищем, та обґрунтування ефективних технічних рішень щодо подовження їх ресурсу.

Для реалізації зазначеної мети в роботі було передбачено розв'язання комплексу взаємопов'язаних **науково-практичних завдань**, зокрема: дослідити особливості формування та розвитку процесів зношування робочих органів посівних комплексів залежно від умов їх взаємодії з ґрунтом; проаналізувати існуючі та перспективні підходи до підвищення зносостійкості робочих органів і обґрунтувати найбільш доцільні з них для практичного застосування; експериментально, в умовах лабораторних досліджень, встановити раціональні способи зміцнення робочих органів, що забезпечують зниження інтенсивності зношування; перевірити ефективність запропонованих рішень шляхом проведення експлуатаційних випробувань удосконалених робочих органів у виробничих умовах.

**Об'єкт дослідження** – процеси зношування робочих органів посівних комплексів, що виникають унаслідок їх взаємодії з ґрунтовим середовищем.

**Предмет дослідження** – закономірності змін фізико-механічних характеристик матеріалу та геометричних параметрів робочих органів посівних комплексів у процесі їх експлуатації.

**Методи дослідження.** Під час виконання роботи застосовано комплекс теоретичних і експериментальних методів дослідження, що включають положення трибології, статичної фізики, теорії надійності та фізики твердого тіла. Лабораторні експерименти проводилися з використанням спеціалізованої дослідної установки, розробленої автором. Експериментальні дослідження виконано за загальноприйнятими стандартними методиками, а обробку отриманих результатів здійснено з використанням методів математичної статистики та теорії ймовірності із залученням прикладного програмного забезпечення для персональних комп'ютерів.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. **Нагребецький Д. В.** Абразивні властивості ґрунтового середовища. Збірник тез доповідей XII Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання» з нагоди 118-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, віцепрезидента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906-1987) 20-21 лют. 2025 р., м. Київ / МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. К.: Видавничий центр НУБіП України, 2025. С. 73-75.

2. Дерев'янюк Д. А., **Нагребецький Д.В.**, Добранський С. С., Руденко В. Г., Мельник О. П. Підвищення надійності ґрунтообробних машин. Збірник тез доповідей XI Міжнародної науково-практичної конференції "Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь. РТDSTSAMT-2025" з нагоди 30-річчя започаткування підготовки ОС "Бакалавр" за спеціальністю "Агроінженерія" 11 квітня 2025 року

МОН України. Житомирський агротехнічний фазовий коледж. Житомир. 2025. С. 92-93. <https://doi.org/10.64165/proceeding-ptdstsamt.2025>.

3. Герасимчук Д.В., Шевчук О.А., Польовий А.В., , **Нагребецький Д.В.** Методи підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали V Міжнар. наук.-практ. конференції молодих учених (Запоріжжя, 03-28 лютого 2025 р.). Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. С. 111-112.

**Практичне значення одержаних результатів.** Основні підсумки виконаних досліджень орієнтовані на забезпечення зростання експлуатаційної надійності посівних комплексів. За результатами отриманих науково-експериментальних даних сформульовано практичні рекомендації щодо обґрунтованого добору матеріалів і зміцнювальних покриттів для виготовлення робочих органів, зокрема сошників, посівного комплексу Väderstad Rapid A 800 C, що дає змогу підвищити їх зносостійкість та ресурс роботи.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 20 найменувань. Загальний обсяг роботи становить **53 сторінки комп'ютерного тексту, містить 18 рисунків та 1 таблицю.**

## РОЗДІЛ 1

### СТАН ПИТАННЯ, ОБҐРУНТУВАННЯ АКТУАЛЬНОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Робочі органи посівних машин, зокрема сошники, під час експлуатації у полі зазнають інтенсивного зношування через контакт із ґрунтом. Втрати металу на поверхні сошників погіршують їхню функцію формування посівної борозни та підтримання глибини висіву, що може знижувати рівномірність загортання насіння і врожайність. Крім того, зношування призводить до економічних втрат – прискореної заміни деталей, простоїв техніки, зростання витрат пального. Встановлено, що спрацювання ґрунтообробних органів відчутно підвищує собівартість агротехнічних операцій і негативно впливає на продуктивність рослинництва. Так, за оцінками, щорічні витрати через зношування ґрунтообробної техніки обчислюються мільйонами доларів у масштабах галузі. В цих умовах актуальним є глибокий аналіз механізмів зношування сошників – ключових робочих органів посівних агрегатів – з метою підвищення їх довговічності та забезпечення стабільної якості сівби.

#### 1.1. Типи сошників посівних комплексів

Сошник – це робочий орган сівалки, призначений для формування борозни у ґрунті, укладання насіння на задану глибину та часткового загортання його ґрунтом. Сошники різних типів застосовуються залежно від технології обробки ґрунту (традиційна з оранкою, мінімальна, no-till пряма сівба) та властивостей ґрунту. Основні різновиди сошників посівних комплексів включають:

Дискові сошники – виконані у вигляді обертових дисків (однорискові або дворискові). Два диски з нахиленими один до одного площинами формують V-подібну борозну, або один вертикальний диск розрізає ґрунт і рослинні рештки. Дискові сошники добре працюють за наявності мульчі (пожнивних решток), майже не забиваються вологим ґрунтом та здатні ефективно різати пожнивні

рештки. Їх перевагою є плавний хід та висока зносостійкість – сучасні моделі мають збільшений діаметр дисків, що покращує довговічність і дозволяє сіяти на швидкостях до 20 км/год. До того ж, обертальний рух диска при контакті із ґрунтом зменшує інтенсивність абразивного зношування порівняно з нерухомими сошниками інших типів. Практика зазначає, що однодискові сошники майже не потребують обслуговування і зношуються мінімально (частіше страждають елементи кріплення від односторонніх навантажень). Недоліком дискових сошників може бути гірше утримання глибини на нерівній поверхні без додаткових колес-копірів, а також потреба в достатньому притискному зусиллі (50–100+ кг) особливо для прямої сівби по необробленому ґрунту.

Анкерні сошники – це нерухомі ножі або долота, що занурюються в ґрунт подібно до лапи культиватора. Вони утворюють щілиноподібну або клиноподібну борозну, частково підрізаючи та розсовуючи ґрунт. Анкерні (часом звані чизельні або долотоподібні) сошники були особливо поширені з появою мінімальних технологій, зокрема відомий “сошник Андерсена” – вузький клин з гострим кутом атаки. Модернізовані анкерні сошники можуть оснащуватися змінними наконечниками-наральниками зі загостреним лезом для легшого проникнення в ґрунт. Їхні переваги: нечутливість до великої кількості рослинних решток на поверхні (не намотують їх, на відміну від дисків), краще збереження однакової глибини загортання у щільних, важких ґрунтах та додаткове розпушення ґрунту в зоні рядка. Однак анкерні сошники спричиняють вищий опір руху і, як правило, інтенсивніше зношуються, адже постійно труться об ґрунт всією робочою поверхнею. Через високе абразивне навантаження їх нерідко виготовляють зі змінними долотами (накладками), що можна швидко замінити після спрацювання. Тенденція сучасного машинобудування така, що анкерні сошники поступово втрачають популярність, їх застосовують лише за специфічних умов, натомість ~85% нових сівалок оснащуються дисковими сошниками.

Полозкові сошники – різновид анкерних, мають плоский “полоз” (лыжу), який розрізає і розсовує ґрунт, формуючи U-подібну борозну. Використовуються переважно у традиційних сівалках для обробленого (розпушеного) ґрунту. Полозковий сошник забезпечує стабільну глибину на рівному полі, але дуже чутливий до рослинних решток (може забиватися) і не придатний для прямих посівів. Зношування таких сошників проявляється у сточуванні нижнього ножового краю (“лез”) – поступово лезо тупиться і борозна формується гірше. Для підвищення ресурсу полозків застосовують наплавлення твёрдосплавних покриттів або конструкції з самозагострюваним лезом, коли форма полоза забезпечує збереження гострого кута при стиранні металу.

Комбіновані сошники – конструкції, що поєднують елементи різних типів. Приклад – сошники типу CrossSlot, де вузький прорізувальний диск поєднаний з горизонтальним ножем: диск ріже стерню і створює щілину, а ніж формує *T-подібну* борозенку. Інший приклад – системи, де перед анкерним сошником встановлений хвилястий диск для підрізання пожнивних решток. Комбіновані рішення дозволяють адаптувати посівний комплекс до важких умов: диск полегшує входження, а ніж розширює борозну та покращує укладання добрив і насіння. Водночас, кожен додатковий елемент – це додаткове джерело зношування (наприклад, диск-прорізувач також потребує заміни). Тому в комбінованих системах часто передбачають використання високоміцних матеріалів і змінних деталей на найбільш навантажених зонах.

Слід зазначити, що вибір типу сошника істотно впливає на характер його зношування. Дискові сошники працюють у режимі котіння і різання, отже мають переважно контактне зношування по периферії диска. Натомість полозкові й анкерні сошники зазнають ковзання всією поверхнею, тому їхнє спрацювання більш рівномірне по площі леза, із максимальним зносом на нижньому ребрі (носику) сошника. У комбінованих сошниках може спостерігатись поєднання патернів зношування: наприклад, у дисково-ножовому – круговий знос кромки диска плюс стирання та туплення ножа.

## 1.2. Види та механізми зношування сошників

Контакт робочих органів із ґрунтом викликає різні види зношування матеріалу. У випадку сошників основним є абразивне зношування – поступове видалення частинок металу під дією твердих мінеральних включень ґрунту (піщинки кварцу, дрібні камінці тощо) при відносному русі. Абразивний знос у ґрунті відбувається за схемою “відкрите трибо-тіло”: тверді частинки ґрунту є третьою фазою між металевим сошником і масою ґрунту, вони не жорстко фіксовані, а вільно переміщуються і перекочуються між контактуючими поверхнями. Тиск на окремі зерна, як правило, невеликий (низький контактний тиск), тому вони ковзають і дряпають переважно одну сторону – поверхню сошника. Такий процес класифікується як *низьконапружене тритіло-абразивне спрацювання*, характерне для ґрунтообробних знарядь. На мікроскопічному рівні абразивний знос сошників включає сукупність чотирьох мікомеханізмів: мікрорізання (вирізання дрібних часток металу гострими кінцями абразиву), мікрооранка (пластичне переміщення металу без відокремлення – утворення борозен і гребінців), мікровтома (накопичення субмікроскопічних тріщин від повторних навантажень) та мікротріщиноутворення (крихке відламування дрібних фрагментів поверхні). Співвідношення цих механізмів залежить від властивостей матеріалу сошника і режиму роботи: при малій глибині проникнення абразиву переважає мікроплузнення (борознування з утворенням наклепу), тоді як більша жорсткість контакту призводить до мікрорізання з утворенням стружки та прискореним зносом.

Інші види зношування для сошників виражені меншою мірою, але можуть проявлятися в певних умовах:

- Адгезійне зношування – можливе при терті металевих частин одна об одну. У сошниках воно мінімізоване, адже основний контакт – із ґрунтом (неметалевим середовищем). Однак адгезійні ефекти можуть виникати, наприклад, між диском сошника і притискним чистиком (скребком), якщо його

неправильно відрегульовано: метал скребка третється об метал диска, викликаючи задирки. Такі випадки призводять до локального прискореного спрацювання кромки диска.

- Корозійне (хімічне) зношування – окиснення металу у вологому ґрунті, особливо за присутності агресивних сполук (удобрив, ґрунтових кислот). Сам по собі корозійний фактор зазвичай не є визначальним для швидкості спрацювання сошників, проте в поєднанні з абразивом утворює абразивно-корозійний знос, коли поверхня металу послаблена іржею легше дряпається і руйнується частинками ґрунту. Відомо, що вибір зносостійких і корозійно-стійких матеріалів (легованих сталей, твердих сплавів) уповільнює іржавіння і тим самим знижує сумарний знос у агресивних ґрунтових умовах.

- Ударне зношування – має місце, коли сошник стикається з каменями або твердими грудками на великій швидкості. Навіть поодинокі удари можуть викликати сколювання країв, утворення тріщин або пластичне вм'ятин металу. Особливо вразливі до ударів тверді, але менш в'язкі матеріали (наприклад, тврдосплавні напайки можуть відколотися при ударі). Тому у конструкціях сошників часто передбачають комбінацію твердого різального шару і в'язкої основи, що гасить удар (про це докладніше – у розділі про матеріали). Ударне навантаження також може спричинити втомне руйнування – злам стійки сошника або тріщини в місцях кріплення внаслідок багаторазового динамічного навантаження.

Таким чином, спрацювання сошників у ґрунті має комплексний характер, але домінуючим є абразивний механізм у різних його проявах. Поступове сточування металу призводить до змін геометрії робочого органу – зменшення діаметра диска, скруглення носка анкерного сошника, затуплення леза полозка тощо. Це погіршує технологічні показники сівби. Наприклад, при надмірному зносі дискових сошників зменшується діаметр і товщина диска, що не дозволяє повністю розкрити борозну і стабільно витримати глибину; у щілину починає обсипатись ґрунт і потрапляти пожнивне сміття, що перешкоджає нормальному

укладанню насіння. Тому виробники техніки рекомендують замінювати диски після втрати певного розміру. Зокрема, для дводискових сошників діаметром 380 мм граничним зносом вважається зменшення діаметра на ~12–14 мм – після цього диски підлягають заміні, адже подальша робота призведе до неглибокої сівби та неоднакового загортання по рядках.

Полеві дослідження підтверджують, що швидкість зношування може бути дуже високою залежно від умов. Навіть після наробітку всього 6 гектарів лінійне спрацювання сошників сівалки *Kverneland Optima HD* становило 4–12 мм, а після 43 га роботи сошники сівалки *Kuhn Planter* втратили в товщині/довжині від 4,2 до аж 40,7 мм. Настільки велика варіація зумовлена різними умовами експлуатації – типом ґрунту, вологістю, швидкістю руху та конструкцією самих сошників. Аналіз зони зношування показує, що найбільший знос у дискових сошників відбувається по периферії диска (край сточується і диск зменшується у діаметрі), тоді як у анкерних – на передній нижній крайці долота (носик сточується і заокруглюється). У результаті, наприклад, *плоский дводисковий* сошник при спрацюванні утворює вужчу V-подібну щілину, а *анкерний* – більш широке, але мілкіше ложе, ніж передбачено новою деталлю.

### **1.3 Вплив ґрунтових умов на зношування**

Швидкість зносу сошників суттєво залежить від властивостей ґрунту, в якому працює посівний агрегат. До найважливіших факторів належать гранулометричний склад ґрунту (вміст піску, частка абразивних мінералів), вологість ґрунту, його щільність та твердість, а також наявність каміння.

Абразивність ґрунту (механічний склад). Ґрунти з високим вмістом піску, грубих часток і твердих мінералів спричиняють інтенсивніше спрацювання металу. Дослідження показують пряму залежність: чим більші за розміром та твердістю піщані частинки в ґрунті, тим вищий знос робочих органів. Зерна кварцу (основа піску) мають твердість ~7 за шкалою Мооса і легко дряпають

сталь. Отже, піщані та супіщані ґрунти є найбільш “абразивно небезпечними”. Навпаки, глинисті дрібнозернисті ґрунти можуть чинити менше абразивне стирання, хоча і створюють більший прилипання та опір руху. В польових умовах відмічено, що знос сільгоспінструментів у піщаних ґрунтах збільшується зі зростанням долі піску і кварцових фракцій у ґрунті. Так само, наявність кам’янистих включень (гравію, дрібного щебеню) різко підвищує абразивне та ударне навантаження – при роботі на таких полях сошники стираються і деформуються значно швидше.

Вологість ґрунту. Вологісний режим впливає двояко: вода може слугувати мастилом, зменшуючи тертя, але також сприяє утворенню жорстких ґрунтових агрегатів (при оптимальній вологості) і корозії металу. Експериментальні дослідження показали, що існує певна критична вологість ґрунту, за якої абразивний знос максимальний. Для піщано-суглинкових ґрунтів найінтенсивніше спрацювання спостерігалось при вологості ~8–12%, а для важчих суглинків – при 9–13%. Це відповідає оптимальній вологості для обробітку, коли ґрунт має мінімальний опір різанню, але достатньо міцний, щоб діяти як абразив. При нижчій вологості (ґрунт пересушений) знос дещо менший, бо частинки менш зв’язані й можуть відхилятися, до того ж частина дрібних пилюватих абразивів видувається. При вищій вологості (ґрунт вологий, пластичний) також сповільнюється зношування – вода виконує роль мастила і пом’якшує контакт частинок з металом. Проте надмірна вологість небажана у полі через інші причини (прослизання техніки, налипання). Отже, найгіршим для довговічності сошників є проміжний, помірно вологий ґрунт, який забезпечує максимальну абразивну дію. Цей ефект зафіксовано і математично: функція інтенсивності зносу має пік при вологості близько 10% і знижується при відхиленні як в сухий, так і у надмірно вологий бік. Цікаво, що матеріал сошника (сталь різних марок) майже не впливає на характер зміни зносу від вологості – він лише визначає абсолютний рівень зносостійкості, але крива “вологість–зношування” має подібну форму для різних сталей.

Щільність і твердість ґрунту. Ущільнений, твердий ґрунт (висока питома маса, наприклад, висохла глина або плужна підшва) спричиняє збільшення сил тертя і тиску на сошник, що підсилює знос. Чим важче ріжеться ґрунт, тим більше енергії витрачається на його деформацію – при цьому значна частина цієї енергії витрачається на тертя і дряпання робочої поверхні. Тверді грудочки ґрунту діють як абразивні частинки високої твердості. Відомо, що ступінь ущільнення (щільність ґрунту) входить до числа факторів, що враховуються у моделях зношування ґрунтообробних знарядь. Зокрема, у математичних описах зносу враховують *ступінь утрамбованості ґрунту і механічні властивості часток* як змінні, що пропорційно впливають на інтенсивність абразивного спрацювання. Практично це означає, що на переущільненому полі (наприклад, після проходу важкої техніки по вологому ґрунту) сошники сточуються швидше, ніж на розпушеному ґрунті після оранки.

Швидкість руху та глибина. Хоча ці параметри більше стосуються режимів роботи, вони тісно пов'язані з ґрунтовими умовами (через опір ґрунту) і теж впливають на знос, тому згадаємо їх тут. Підвищення швидкості сівби (руху агрегату) посилює абразивну дію, адже збільшується відносна швидкість ковзання ґрунтових часток по металу і частота їх ударів. Дослідження відзначають, що знос знарядь зростає із збільшенням швидкості та робочої глибини. Глибший хід сошника означає більшу площу контакту з ґрунтом і часто – щільніший ґрунт на глибині, тому спрацювання прискорюється. Таким чином, для мінімізації зносу рекомендують дотримуватись оптимальних агротехнічних швидкостей (для більшості сівалок – до ~8–12 км/год в залежності від типу сошника) та не заглиблювати сошник більше необхідного.

Підсумовуючи, найбільш несприятливі для сошників умови – це сухі піщані або гравійні ґрунти при помірній вологості (близько 8–12%) та високій твердості. В таких умовах знос максимальний. Навпаки, на структурному вологому чорноземі, багатому глиною і гумусом, при помірних швидкостях – зношування буде найменшим. Різниця може бути колосальною: у практиці

відомі випадки, коли комплект сошників, що відпрацював сотні гектарів на одному полі, на іншому (більш піщаному) зносився до граничного стану за десятки гектарів. Це слід враховувати при експлуатації – зносостійкість деталей слід оцінювати саме в конкретних ґрунтових умовах.

#### **1.4. Конструкційні фактори та матеріали сошників**

Геометрія та кінематика сошника. Конструкція робочої частини визначає характер взаємодії з ґрунтом і, як наслідок, знос. Ключові геометричні параметри – це *кут заходження у ґрунт, форма клина, товщина та кривизна леза*. Сошник із гострим кутом різання легше проникає у ґрунт, знімає тонший шар, тому чинить менший опір і менше зношується (але може сильніше роздрібнювати ґрунт). Навпаки, тупий кут (широкий клин) більше ущільнює дно борозни, зрушує великий об'єм ґрунту – це підвищує тертя і знос, зате краще формує борозну певного профілю. Ширина леза також важлива: вузький ніж (наприклад, анкерний сошник 12–20 мм шириною) випробовує концентрований тиск на малу площу – це може збільшити глибину проникнення абразивних частинок і інтенсивність мікрорізання. Ширші лапи (долотоподібні сошники) розподіляють навантаження по більшій площі, тому питоме спрацювання зменшується, але загальна сила тертя вища через більшу фронтальну площу. Таким чином, кожна конструкція має компроміс між продуктивністю і зносостійкістю.

Дискові сошники, завдяки круглій формі, мають самозагострювальний ефект: край диска залишається відносно тонким при зношуванні, оскільки стирається переважно периферійна частина. Обертання диска також означає, що кожна точка ріжучої крайки контактує з ґрунтом лише на частині обороту, потім охолоджується і очищується. Це зменшує перегрів і налипання ґрунту, сприяючи рівномірному зносу. Крім того, у диска відсутня постійна “сторона тиску” – навантаження циклічно змінюється, що запобігає надмірній локальній втомі

матеріалу. Наслідком є довший ресурс: встановлено, що за інших рівних умов абразивний знос у дискового сошника менш виражений, ніж у нерухомих ножових (анкерних) сошників. За даними досліджень, обертання знижує інтенсивність стирання, що дозволяє дискам працювати на більших площах до досягнення граничного зносу.

Важливим фактором є розмір диска. Збільшення діаметра дискового сошника підвищує його довговічність. Великий диск має довшу окружність, тож при тій самій пройденій відстані кожна точка крайки долає більший шлях до повного обороту – отже, цикл навантаження/відпочинку довший. Крім того, більший диск входить у ґрунт під меншим кутом атаки і котиться більш плавно, знижуючи питомий тиск на частинки. Сучасні тенденції – перехід від 14–15" дисків до 18" і більше на посівних комплексах – саме мотивовані потребою підвищити ресурс і забезпечити стабільну роботу на високій швидкості. Зі зростанням діаметра диска зазвичай збільшують і його товщину для міцності, але товщий диск теоретично зношується довше (бо більший запас металу до критичного зменшення діаметра).

Матеріали сошників та їх зносостійкість. Традиційно сошники виготовляють зі спеціальних борованих або загартованих сталей, що поєднують високу твердість поверхні з достатньою міцністю. Прикладом є сталь 30MnB5 (борвмісна сталь), з якої виготовляють багато ґрунтообробних ножів і дисків; її твердість після термообробки сягає ~45–50 HRC. Для підвищеної зносостійкості застосовують сталі типу Hardox 500, Hardox 600 – із твердістю 50–60 HRC по всьому перерізу. Згідно з дослідженнями, сошники з Hardox-службовці витримують набагато довший пробіг до зносу, але їх складніше обробляти і вище ризик крихких поломок при ударах. Перспективним підходом є диференційована твердість: наприклад, сучасні диски виготовляють із бористої сталі з *індукційним гартуванням* лише крайової зони. Компанії-виробники повідомляють, що край диска може мати твердість 55–58 HRC, тоді як доцентрові шари – 50–55 HRC, а серцевина лишається відносно в'язкою ~49–50 HRC. Така *градієнтна твердість*

забезпечує стійкість різальної крайки до стирання (високоякісна загартована поверхня довше не сточується) та одночасно ударну в'язкість центральної частини (щоб диск не тріскав під навантаженням від сошникового корпусу). Таким шляхом досягається суттєве збільшення ресурсу без втрати надійності: тверда кромка повільніше зношується, а гнучкий центр запобігає ламанню диска на камінні.

Для анкерних і полозкових сошників також використовують високовуглецеві сталі з термічною обробкою (гартуванням/відпуском) до твердості близько 50 HRC. Важливо, щоб лезо сошника було не лише твердим, але й самозаточувальним – тобто в процесі зношування зберігало форму гострого клину. Цього досягають як через конструкцію (відповідний кут клина), так і матеріал. Наприклад, існують рішення із наплавленням на лезо зносостійкого матеріалу такої форми, що при сточуванні оголюється нова гостра грань (конструкція *самозагострюваного леза* сошника). Інженери також експериментують з довжиною та кутом фаски різучих крайок: подовжена фаска забезпечує плавніше заглиблення і довше лишається ефективно гострою при спрацюванні. Зокрема, для дискових сошників помічено, що *більша довжина скосу леза* дозволяє диску залишатися гострим аж до моменту повного зносу – поки диск не зменшиться до мінімального діаметра. Коротка крута фаска, навпаки, швидко тупиться, і половина ресурсу диска може пройти з вже неідеальною різальною здатністю.

Щоб підвищити строк служби сошників, широко застосовують зміцнювальні покриття та наплавлення. На нові або відновлені деталі наносять шар матеріалу з підвищеною твердістю – наприклад, порошковими дротами з твердими карбідами (типу ПП-180Х9 тощо). В результаті утворюється наплавлений “пластир” на найбільш зношуваних ділянках – різучій крайці, нижньому боці полоза чи долота. Експериментально встановлено, що наплавлення таких матеріалів на лезо сошника зі сталі 30MnB5 або Hardox може підвищити зносостійкість деталі у 7–13 разів порівняно з ненаплавленою. Цей

величезний ефект пояснюється тим, що тверді включення (наприклад, карбіди хрому) у наплавленому металі активно протидіють врізанню абразивних частинок ґрунту і уповільнюють всі мікромеханізми зносу. В Україні та світі розроблено низку технологій зміцнення сошників: дифузійне насичення поверхні бором або хромом, електродугове наплавлення твердими сплавами, нанесення зносостійких пластин із карбідовольфрамівими вставками тощо. Зокрема, для анкерних сошників (долот) пропонують комбіновані зміцнювальні покриття, що одночасно підвищують стійкість до стирання і удару.

Вибір матеріалу та методу зміцнення тісно пов'язаний з економічною доцільністю. Найдорожчі рішення (наприклад, напайка твердого сплаву або застосування надтвердих матеріалів типу надміцної кераміки) не завжди виправдані, якщо знос сошника і так помірний. Часто достатньо виготовити деталь із якісної загартованої сталі і замінювати її через встановлений інтервал. Важливо врахувати, що надмірно тверді сошники можуть пошкоджувати ґрунт (підвищене ущільнення борозни), а також руйнуватися крихко. Тому сучасний підхід – баланс твердості та в'язкості. Як згадано, для дисків зональна термообробка вирішує це завдання. Для ножових сошників часто комбінують тверді пластини на носіку та пружну основу (наприклад, напайка на стиральну частину, а кріплення – болтове з можливістю невеликого люфту для гасіння ударів). Таким чином досягається і довговічність, і надійність в роботі.

### **1.5. Фізико-механічні явища при контакті сошника з ґрунтом**

При заглибленні сошника в ґрунт і його русі відбувається складна взаємодія між металом та ґрунтовими частинками, що супроводжується низкою фізико-механічних явищ. Розглянемо основні з них, оскільки розуміння цих процесів допомагає пояснити механізми зношування.

Сили тертя і тиску. Ґрунт чинить опір руху сошника, породжуючи силу різання (тягловий опір). Ця сила має дві компоненти: нормальну

(перпендикулярну до поверхні сошника – тиск ґрунту) та дотичну (паралельну – власне сила тертя ковзання). Нормальний тиск визначає глибину проникнення абразивних часток у поверхню металу: при високому тиску навіть дрібні піщинки можуть врзатися і різати метал, залишаючи подряпини. Дотична складова відповідає за протяжність ковзання – вона зумовлює *ковзаючий рух* частинок уздовж поверхні, що спричиняє мікроплування або мікрорізання. Коефіцієнт тертя “метал-ґрунт” залежить від вологості та стану ґрунту: у сухому сипкому ґрунті він вищий, у вологому – нижчий через змащувальну дію води. Встановлено, що зменшення тертя (наприклад, шляхом нанесення антифрикційних покриттів типу тефлону або полімерів) може знизити і зношування, і тяговий опір одночасно. Адже менше тертя – менше тепла і менше відривів часток металу. Однак повністю уникнути тертя неможливо, тому матеріал сошника має поєднувати високу твердість (для зниження адгезії ґрунтових зерен) та достатню гладкість поверхні.

Деформація ґрунту. Сошник працює, деформуючи ґрунт: ріже, ущільнює, відтісняє його в боки. Перед робочою частиною утворюється *зона напружень*, в якій ґрунт частково руйнується (зрізується) і частково пресується. Це проявляється виникненням *хвилі ґрунту* перед сошником, особливо помітної у швидкісних режимах. За сошником ґрунт обвалюється, формуючи стінки борозни. Ці процеси важливі щодо зносу: під час різання (в зоні утворення тріщин у ґрунті) відбуваються ударні навантаження на край сошника, а при ковзному обтиранні ущільненого ґрунту об бокову поверхню – інтенсивне тертя. Дослідження з використанням методу дискретних елементів (DEM) показали, що навколо різальної крайки утворюються *лінії зсуву* в ґрунті і концентруються абразивні частинки, які найбільш сильно впливають на метал. Після затуплення носика сошника зона руйнування ґрунту зміщується і розширюється, тому навантаження розподіляється по більшій площі – в результаті спостерігається деяке зменшення інтенсивності зносу після початкового періоду “притиру”. Це

явище, відоме як *стабілізація зносу*, коли після швидкого сточування гострого краю встановлюється рівномірніший режим тертя.

Наклеп і нагрівання поверхні. При мікроплученні металу (коли абразив не вириває частку, а лише зміщує її) відбувається *наклепування* поверхневого шару – тобто холодне зміцнення через пластичне деформування. Наклепаний метал стає твердішим і більш крихким. З одного боку, це тимчасово підвищує стійкість до подряпин (твердість зростає), з іншого – сприяє утворенню тріщин (крихкість). Періодично наклепаний шар може відколюватися, утворюючи дрібні лусочки зносу. Цей процес входить до механізму мікротіми і мікротріциноутворення. Одночасно тертя спричиняє *нагрівання* контакту. Температура, як правило, невисока (на відміну від сухого тертя метал-метал), бо ґрунт відводить тепло і має вологу. Проте локально по краях леза температура може підвищуватися до десятків °С, що достатньо для прискорення окислення (корозії) та зниження міцності металу. Тому часто на зношених деталях спостерігається тонка окисна плівка або знебарвлення. Нагрів небезпечний і тим, що може викликати відпуск загартованої сталі (пом'якшення) – але в сошниках це мало ймовірно через інтенсивне охолодження ґрунтом. Важливо, що за дуже великих швидкостей (20+ км/год) і відсутності належного охолодження тертя може перейти в *режим прискореного спрацювання* з утворенням термічних тріщин.

Частинки зносу і вторинне абразування. В процесі тертя утворюються дрібні частинки зношеного металу (стружка, пил) і подрібнений ґрунт. Ці частки нерідко залишаються в зоні контакту, перетворюючись на додатковий абразив. Фактично, виникає *додаткове тріло*: відокремлені частинки металу можуть тверднути (наклепані) і далі дряпати основний масив. Таким чином, продукти зносу, якщо їх не відвести, самі спричиняють знос. Цей ефект відзначався ще в класичних дослідженнях тертя: наявність в абразивній суміші часток заліза підвищує знос сталевих зразків. В умовах сошника більшість часток зносу одразу зноситься потоком ґрунту назад по борозні, проте частина може

вклинюватися між деталями (наприклад, між двома дисками дводискового сошника або між сошником і ущільнювальним колесом). Тому конструкції передбачають очищувачі (скребки), які знімають налиплий ґрунт і видаляють сторонні частки.

Вібрації та коливання. Рух сівалки по полю ніколи не буває абсолютно плавним – ґрунт неоднорідний, агрегат відчуває коливання. Сошники можуть підстрибувати на нерівностях, коливатися на пружинних підвісах. Ці високочастотні коливання викликають періодичне розвантаження та ударні повторні контакти, що сприяє втомному накопиченню пошкоджень. Вібрації також можуть призводити до мікроскопічного ковзання (фретингу) між сполученими деталями сошникового вузла – наприклад, між болтом кріплення і отворами, що теж викликає знос (але це вже знос елементів рами). Для самих же робочих органів вібрація може трохи знижувати абразивний знос (струшування ґрунту, зменшення постійного тертя), але загалом небажана через інші причини. Інженери прагнуть гасити надмірні коливання – застосовують демпфери, регулюють тиск тощо – більше для забезпечення рівномірної глибини, але побічно це може зменшити і зношення.

Розглянуті явища демонструють, наскільки складним є процес взаємодії “сошник – ґрунт”. Він включає елементи трибології (тертя, знос), механіки ґрунтів (деформація і руйнування ґрунтової структури) та динаміки машин (вібрації). Параметри матеріалу сошника (твердість, міцність, теплоємність) та параметри ґрунту (твердість, зернистість, вологість) разом визначають кінцеву картину зношування. Розуміння фізико-механічних процесів дозволяє створювати адекватні моделі і випробування, про що йтиметься далі.

## **1.6. Експериментальні методи дослідження зношування сошників**

Дослідження зносостійкості робочих органів проводяться як в лабораторних умовах, так і безпосередньо в полі. Мета експериментів –

кількісно оцінити швидкість зношування, виявити зони максимального спрацювання та перевірити ефективність нових матеріалів або конструкцій.

Польові випробування. Найбільш достовірну інформацію про знос дає експлуатація сошників у реальних умовах сівби. Типово випробування проводять так: на сівалку встановлюють нові сошники, засівають певну площу (десятки гектарів), після чого вимірюють ступінь зношування. Вимірювання включають зміну маси деталі (після очищення від ґрунту), зменшення лінійних розмірів (діаметра диска, довжини або ширини ножа, товщини леза). Наприклад, у згаданому досліді на *Kverneland Optima* заміряли лінійний знос – різницю в довжині/радіусі сошника до і після напрацювання 6 га. У іншому випадку для дисків заміряли втрату маси і діаметра після 80 та 380 га роботи, знаходячи тенденцію зменшення маси на ~1,85% після 80 га і ~4,9% після 380 га. Екстраполяція цих даних дала оцінку, що диски повністю (на 10–12 мм радіусу) спрацюються приблизно за 3000 га. Польові тестування дозволяють одночасно оцінити і *вплив умов*: нерідко поруч випробовують однакові сошники на різних фонах (наприклад, на піщаному і глинистому полі) для порівняння. Для об'єктивності випробування виконують за стандартами: наприклад, кожні 10 га зупинка і замір, чи кожні 5 годин роботи. Важливо враховувати, що польові методи хоча й правдиві, але займають багато часу і залежать від погоди. Тому розроблено лабораторні методики для прискореного моделювання польового зношування.

Лабораторні стенди та моделі ґрунту. Одним із підходів є використання *абразивних кругів або барабанів*. Згідно з методиками випробувань на абразивне спрацювання, зразок металу притискають до рухомої поверхні (шліфувального круга, стрічки або обертового барабана), посипаної абразивним матеріалом, і за певний час визначають втрату маси. Проте такий підхід не повністю імітує ґрунт, адже абразив (наприклад, кварцовий пісок) може діяти агресивніше, ніж у природному стані. У деяких лабораторіях створюють *контейнери з ґрунтом*, де зразок сошника переміщується під навантаженням. Це своєрідний ґрунтовий

тунель або короб, наповнений стандартизованим ґрунтовим матеріалом певної вологості і щільності. Зразок (відрізок леза або мініатюрна модель сошника) кріпиться до маятника або рухомої каретки і здійснює зворотно-поступальні рухи в ґрунті, імітуючи посівний сошник. Після певної кількості циклів зразок демонтують і вимірюють знос. Такі *прискорені випробування металевих поверхонь на абразивне зношування* розроблені, зокрема, українськими вченими. Вони дозволяють за короткий час (кілька годин) змодельовати знос, еквівалентний десяткам гектарів роботи.

Часто застосовують стандартні методи на зразках сталі, з яких зроблені сошники, – наприклад тест «сухий пісок – гумове колесо» (ASTM G65), де сталевий зразок притискається до обертового гумового диска, посипаного кварцовим піском. Цей тест характеризує відносну абразивну стійкість матеріалів. Але він не враховує специфіку ґрунту (вологу, агрегацію часток, хімічний склад). Тому для більшої достовірності багато дослідників модифікують методику: використовують реальний ґрунт у барабані, додають воду для імітації вологості, вводять цикли просушування тощо.

Вимірювання та спостереження зони зношування. Окрім кількісних змін маси і розміру, досліджується *морфологія зношеної поверхні*. Зношені сошники оглядають візуально, фотографують, вимірюють профілографом глибину подряпин. Сучасні методи включають 3D-сканування поверхні та мікроскопію. Наприклад, 3D-профілометрія дозволяє побудувати карту борозен і визначити параметри подряпин (глибину, ширину) для аналізу мікромеханізмів зношування. Наявність довгих паралельних подряпин вказує на мікрорізання, хвилясті гребені – на мікроплузнення, дрібні вибоїни – на виривання часток або втомні відколювання. Таким чином, лабораторні дослідження дають не лише інтегральну величину зносу, а й розуміння, як він відбувався. Це цінно при оцінці нових матеріалів: наприклад, порівнюючи дві сталі, можна виявити, що одна зношується переважно шляхом мікроплузнення (пластично), а інша – мікрорізання з ламанням, і зробити висновки щодо їх придатності.

Випробування матеріалів з покриттями. Окремий напрям – тестування ефективності зміцнюючих технологій (напайки, наплавлення, покриття). Зазвичай виготовляють серію зразків-«ножів» або дисків, частину з них зміцнюють, а частину залишають як еталон. Далі всі зразки одночасно випробують або послідовно в ідентичних умовах, щоб порівняти втрату маси. Так, у дослідях зі сталями 30MnB5, Hardox 500 і 600 було показано, що зносостійкі наплавлені покриття скорочують втрату металу у 7–13 разів – це фіксувалося як різницею мас, так і візуально (наплавлене лезо майже не мало подряпин, тоді як без покриття – значно сточилось). Інший приклад: випробування твердих порошкових наплавок показують зниження інтенсивності зносу на 30–50% і відповідне зменшення тягового опору сошника за рахунок більш гладкої зношеної поверхні.

Натурні спостереження в полі. Додатково до контрольованих експериментів, цінною є інформація від фермерів про реальний ресурс. Ведуться обліки, скільки гектарів витримують сошники різних марок до потреби заміни. Такі дані, хоч і менш точні, дозволяють оцінити ефективність конструкторських рішень. Наприклад, фермерські опитування вказують, що стандартні дводискові сошники можуть працювати близько 500–700 гектарів на середніх ґрунтах, тоді як посилені (з більшими підшипниками та загартованими дисками) – до 1000+ га. Ці цифри узгоджуються з науковими прогнозами і слугують орієнтиром для практики.

Отже, експериментальні дослідження зношування сошників базуються на поєднанні польового досвіду та лабораторного моделювання. Такий підхід дає можливість як оперативно перевіряти нові рішення, так і підтверджувати їх ефективність у реальних умовах. Накопичені експериментальні дані – основа для створення математичних моделей зношування, про що далі.

## 1.7. Моделювання і прогностичні методи зношування

Сучасна наука прагне не лише виміряти, але й передбачити зношування робочих органів за різних умов. Для цього розробляються математичні моделі і використовуються комп'ютерні методи моделювання. Моделювання дозволяє провести *віртуальні експерименти* – змінюючи параметри ґрунту, матеріалу або конструкції, оцінити, як вони вплинуть на ресурс сошника.

Математичні моделі зношування. Класичним підходом є використання рівняння Архарда, яке пов'язує об'єм зношеного матеріалу з силою притискання, шляхом тертя і твердості матеріалу (модель двотілого зносу). Для ґрунтових умов його модифікують, вводячи коефіцієнти абразивності ґрунту. У простій формі інтенсивність зношування  $I$  можна записати як:  $I = k \frac{P}{H}$ , де  $P$  – навантаження (тиск ґрунту на сошник),  $H$  – твердість матеріалу, а  $k$  – експериментальний коефіцієнт зношуваності, що враховує властивості ґрунту (його абразивність, зволоженість). Такий підхід дозволяє оцінити відносний ефект, наприклад, від збільшення твердості сталі чи зменшення навантаження. Проте для точніших прогнозів враховують більше факторів.

У літературі наведено численні моделі багатofакторної регресії, де знос втрата маси або лінійний знос виражають через комбінацію змінних: вміст піску, вологість, швидкість, глибина, твердість сталі тощо. Наприклад, одна з моделей для клиноподібного робочого органу включала аргументи: тип ґрунту (через коефіцієнт абразивності), ступінь ущільнення, пройдена відстань, положення точки на лезі – і дозволяла обчислити профіль сточування леза по довжині. Інші підходи базуються на теорії ударів: оцінюють кінетику частинок ґрунту, що вдаряються об поверхню, і підраховують енергію, витрачену на руйнування матеріалу. Такі моделі іноді застосовують для оцінки зносу дискових ножів при роботі по кам'янистому ґрунту.

Комп'ютерне моделювання (FEM, DEM). З розвитком обчислювальної техніки основними інструментами стали метод скінченних елементів (FEM) та

метод дискретних елементів (DEM). FEM-моделювання дозволяє розрахувати напружено-деформований стан як сошника, так і навколишнього ґрунту, у вигляді безперервного середовища. У таких моделях ґрунт часто задають спрощено (через параметри пружності та пластичності), але можна визначити поля напружень і ковзання по поверхні сошника. На основі цих даних застосовують критерії зношування: наприклад, в кожній точці леза обчислюють роботу тертя і за законом Архарда видаляють невеликий шар матеріалу, оновлюючи геометрію, і так покроково симулюють сточування. DEM-моделі натомість описують ґрунт як сукупність окремих частинок (дисків, кульок), які взаємодіють між собою і з поверхнею інструмента. Це особливо корисно для відтворення процесу абразивного зносу, адже DEM явно симулює рух кожної “піщинки”. Дослідники створюють цифрові моделі вузьких лап або дисків у контейнері з тисяч DEM-частинок: при переміщенні інструмента частинки стирають його, і по траєкторіях та силах можна розрахувати сумарний знос. Наприклад, у одній роботі методом DEM вдалося відтворити характерний шаблон зносу культиваторної лапи, що добре співпав з натурним спостереженням – максимум спрацювання на носку і спадання до задніх крайок.

Комбінацією є НСЕ (номенклатурно-скінченно-елементні) підходи – коли результати DEM (наприклад, розподіл швидкостей і ударів частинок по поверхні) передаються в FEM-модель для розрахунку ерозії матеріалу. Так, Graff і Tong моделювали циліндричний зразок, що рухається в ґрунті, і поступове його сточування, задаючи у DEM алгоритм видалення частинок матеріалу після накопичення певної дози енергії зіткнень. Такі моделі поки що складні й потребують великих обчислювальних ресурсів, але вони дають глибше розуміння процесу.

Прогнозування ресурсу. В підсумку, мета моделювання – спрогнозувати *ресурс сошника* (у гектарах або годинах) до досягнення граничного зносу. Використовуючи експериментально знайдені залежності та результати симуляцій, конструктори можуть побудувати номограми або таблиці: наприклад,

для даного типу сошника вказати очікуваний ресурс при різних умовах (піщаний vs глинистий ґрунт, волога vs суха погода, швидкість 8 vs 12 км/год тощо). Такі прогнозні моделі враховують і економічний аспект: розраховують вартість зносу на гектар, оптимальний час заміни. Це корисно агровиробникам для планування запасу запчастин і технічного обслуговування.

Цікаво, що в новітніх роботах з'являються спроби застосувати штучний інтелект до задач прогнозу зношування. Зокрема, нейромережі навчають на масиві даних (параметри ґрунту, матеріалу і зафіксований знос) і добиваються доволі точного передбачення для проміжних випадків. Такі моделі можуть оперативно оцінити вплив окремого фактора або оптимізувати конструкцію (підбором параметрів, щоб зменшити знос). Проте вони потребують великої навчальної вибірки – тобто попередніх експериментів.

Отже, моделювання вже сьогодні є потужним доповненням до експериментів. Воно підтверджує ключові фактори зношування (твердість металу, вміст піску, швидкість, вологість), дозволяє “програти” різні сценарії і навіть оптимізувати форму сошника. Звісно, моделі мають спрощення і не можуть врахувати абсолютно всі аспекти (наприклад, хімічний склад ґрунту чи випадкові удари камінням), тому їх результати завжди перевіряють польовим експериментом. Але тенденція очевидна: поєднання фізичних експериментів і комп'ютерного моделювання дає найкращий результат у дослідженні зносостійкості ґрунтообробних робочих органів.

### **Висновки по розділу**

Знос сошників посівних комплексів – складний багатофакторний процес, який визначається властивостями ґрунтового середовища, режимом роботи та конструкцією і матеріалом самого сошника. Основним видом спрацювання є абразивне зношування (відкрите тритіло), що проявляється мікрорізнанням і мікроплузненням металу під дією твердих ґрунтових часток. Інтенсивність цього

процесу зростає зі збільшенням абразивності ґрунту – насамперед, із ростом вмісту і розміру піщаних зерен. Вологість ґрунту впливає нелінійно: найбільший знос спостерігається при оптимальній для обробітку вологості (~10%), тоді як надто сухий або занадто вологий ґрунт зношують менше. Підвищена твердість та ущільненість ґрунту, а також зростання швидкості й глибини руху сошника – всі ці фактори додатково посилюють зношування за рахунок збільшення сил тертя та ударних навантажень.

Конструкційні рішення суттєво впливають на довговічність. Дискові сошники, що працюють у режимі котіння, зношуються повільніше, ніж анкерні, забезпечуючи більший ресурс при правильному налаштуванні. Розміри і форма робочих органів також мають значення: збільшений діаметр диска підвищує плавність роботи і стійкість до спрацювання, а оптимальний кут атаки та довжина фаски леза сприяють самозагострюванню і рівномірному сточенню до граничного стану. Використання високоякісних матеріалів – загартованих бористих сталей, зносостійких сплавів – радикально збільшує строк служби. Сучасні технології загартування дозволяють отримати твердий ріжучий край (до 55–58 HRC) при збереженні в'язкої серцевини диска, що знижує і абразивний знос, і ризик ламання. Додаткове зміцнення наплавленими твердими матеріалами може кратно (у 7–13 разів) підвищити зносостійкість сошників, що підтверджено експериментально.

Фізико-механічний аналіз контактної взаємодії показує, що зношування – результат комплексної дії тертя, тиску, ударів і температури. Метал сошника піддається і пластичній деформації, і мікрорізанню; наклеп та локальний нагрів змінюють властивості поверхні, впливаючи на подальший хід зносу. Розуміння цих процесів дало змогу розробити обґрунтовані методи випробувань і моделювання. Експериментальні підходи варіюються від тривалих польових тестів до прискорених лабораторних стендів з модельним ґрунтом. Вони надають кількісні характеристики зносу та виявляють слабкі місця конструкції, що потребують зміцнення. Моделювання з використанням FEM і DEM

підтвердило ключові закономірності та дозволило прогнозувати знос за різних умов з прийнятною точністю. Особливо перспективним є поєднання експерименту і моделювання для оптимізації – наприклад, шляхом цифрових експериментів можна підібрати таку форму або матеріал сошника, які мінімізують знос, і вже потім перевірити їх на практиці.

Практичний висновок: для підвищення довговічності сошників слід комплексно враховувати всі розглянуті аспекти. Вибір типу сошника має відповідати умовам (на мінімальний обробіток – зносостійкі дискові або анкерні з притискним зусиллям  $>100$  кг. Необхідно застосовувати високотверді сталі і зміцнення різальних частин, забезпечувати правильне налаштування агрегатів (кут входження, тиск, глибина) під конкретний ґрунт. Регулярний огляд і своєчасна заміна сильно спрацьованих сошників є критичними, оскільки надмірний знос призводить до браку сівби (неправильна глибина, заклинювання насіння пожнивними рештками). Врахування економічних аспектів – порівняння вартості більш зносостійких (але дорожчих) сошників з вигодою від їх довговічності – має бути частиною управління технічним забезпеченням господарства .

Науковий висновок: хоча проблема зношування ґрунтообробних органів відома давно, і досі є поле для досліджень. Зокрема, потребує уваги точніше врахування впливу кліматичних умов (екстремальні посухи чи перезволоження) та нових матеріалів (наприклад, композитів або керамічних накладок) на знос. Перспективним є біонічний підхід – наслідування природи у створенні поверхонь, стійких до абразивного спрацювання (ґрунторихлючі органи з текстурою як у копит тварин тощо). Подальше поєднання емпіричних даних з комп'ютерним інтелектом може дати проривні результати в прогнозуванні ресурсу і оптимізації конструкцій. Втім, вже нині сукупність українських та зарубіжних досліджень забезпечує міцну наукову основу для вирішення прикладних завдань підвищення зносостійкості сошників посівних комплексів. Це сприятиме зниженню затрат на ремонт, економії пального і стабільному

отриманню високих урожаїв завдяки якісному висіву навіть у складних ґрунтових умовах.

## РОЗДІЛ 2

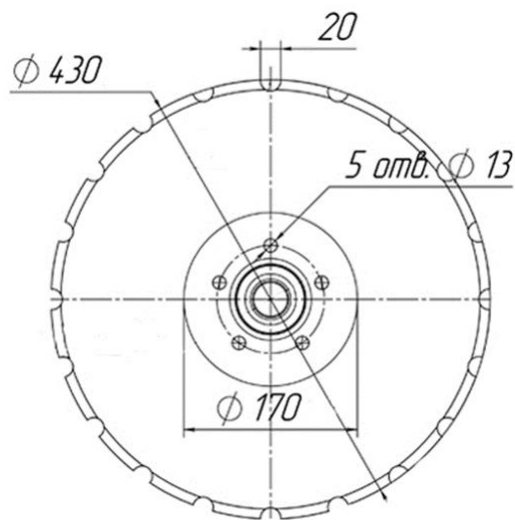
### МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ, МЕТОДИ Й ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Експериментальні дослідження з обґрунтування та вибору технологічного методу підвищення довговічності і зносостійкості робочих органів проводили на посівному комплексі Väderstad Rapid A 800 C в умовах господарств Житомирської області, що належать до ґрунтово-кліматичної зони Лісостепу. Дослідження здійснювали у виробничих умовах з урахуванням реальних експлуатаційних навантажень, характерних для сучасних технологій сівби. Конструктивна схема та принцип дії посівного комплексу наведені на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Конструктивно-технологічна схема посівного комплексу Väderstad Rapid A 800 C.

У сучасних посівних комплексах застосовується широкий спектр робочих органів, що відрізняються за конструктивним виконанням і принципом взаємодії з ґрунтовим середовищем, зокрема анкерні, кілевидні, лапові, а також одно- і дводискові сошники. Кожен із зазначених типів має свої конструктивні особливості, переваги та обмеження, які визначають ефективність їх використання залежно від агротехнологічних умов. У межах даної роботи основну увагу зосереджено на дослідженні однодискового сошника посівного комплексу Väderstad Rapid A 800 C, як одного з найбільш поширених і технологічно досконалих рішень, що забезпечує стабільне формування посівної борозни та надійну роботу в умовах інтенсивної експлуатації.



а)



б)

Рис. 2.2. Основні геометричні параметри (а) та функціональна схема роботи (б) однодискового сошника посівного комплексу Väderstad Rapid A 800 C

Для проведення лабораторних досліджень було виготовлено серію стандартних зразків розміром  $50 \times 50$  мм. Зразки виконували зі сталі SSAB Boron 27, сталі 70Г, а також зі сталі 70Г із нанесеними зносостійкими наплавленими покриттями. Формування захисних шарів здійснювали методом ручного дугового зварювання з використанням електродів марок ОК 84.78, ОК 84.80 та ОК 84.84, які відрізняються підвищеним вмістом легувальних елементів і призначені для підвищення абразивної зносостійкості робочих поверхонь.

Вибір зазначених матеріалів зумовлений їх широким застосуванням у виробництві та відновленні робочих органів ґрунтообробних і посівних машин, а також необхідністю порівняльної оцінки базових і зміцнених поверхонь за умов абразивного зношування. Хімічний склад сталі SSAB Boron 27 та сталі 70Г наведено в таблиці 2.1.

Хімічний склад наплавленого металу, отриманого в результаті ручного електродугового наплавлення, наведено в таблиці 1.2. Подані дані відображають вміст основних та легувальних елементів у сформованому зносостійкому шарі,

що визначає його структурні особливості та експлуатаційні властивості, зокрема твердість і стійкість до абразивного зношування.

Рис. 2.1 – Вміст хімічних елементів у сталях SSAB Boron 27 і 70Г, %

Матеріал	C	Si	Mn	S (max)	P (max)	Cr	B	Ni	Cu
SSAB Boron 27	0,24-0,31	0,1-0,41	1,0-4,1	0,01	0,02	0,1-0,41	0,0008-0,006	-	-
Сталь 70Г	0,68-0,75	0,18-0,38	0,9-1,21	0,035	0,035	до 0,26	-	до 0,25	до 0,2

Таблиця 2.1 – Вміст хімічних елементів у наплавленому металі

Електрод	C	Si	Cr	V	Ti	Mn	Mo	Nb
OK 84.78	4,8	0,8	33,0	-	-	1,1	-	-
OK 84.80	5,1	2,1	23	1,1	W 2,0	0,8	7,1	7,1
OK 84.84.	3,1	2,1	5,8	5,6	4,8	-	-	-

Визначення твердості основного металу та наплавлених зносостійких покриттів здійснювали стандартним методом Роквелла за шкалою «С» (HRC), що дозволяє об'єктивно оцінити механічні властивості матеріалів, які працюють в умовах інтенсивного абразивного навантаження. Вимірювання проводили відповідно до чинних нормативних вимог із забезпеченням необхідної кількості замірів для отримання репрезентативних результатів.

Для проведення лабораторних досліджень з абразивного зношування була розроблена та виготовлена експериментальна установка, що працює за методом «гільзи» (рис. 2.2) та моделює процес зношування робочих органів посівних комплексів у ґрунтовому середовищі. Принцип дії установки полягає у переміщенні випробуваних зразків у масі абразивного матеріалу з

контрольованими швидкісними та силовими параметрами, що забезпечує відтворення умов, наближених до реальної експлуатації сошників.

Як імітаційний абразивний матеріал використовували кварцовий пісок з розміром частинок 50...100 мкм, що за своїми фізико-механічними властивостями відповідає найбільш агресивним компонентам ґрунтового середовища. Швидкість відносного руху зразків у ґрунтовій масі становила 1,7...3,4 м/с (6...12 км/год), що відповідає робочим швидкостям сучасних посівних комплексів у виробничих умовах. Регулювання швидкості руху зразків здійснювали шляхом зміни передавального відношення між ведучими та веденими шківками приводу установки, що дозволяло задавати необхідні режими випробувань.



Рис. 2.2. Експериментальна установка для визначення стійкості матеріалів та зносостійких покриттів до абразивного зношування.

Лабораторні зразки закріплювали на спеціально розробленому валу-тримачі (рис. 2.3), конструкція якого забезпечувала надійну фіксацію випробуваних елементів, стабільність їх просторового положення та відтворюваність умов навантаження під час проведення експерименту. Застосування даного валу-тримача унеможливлювало зміщення або проковзування зразків у процесі випробувань та дозволяло забезпечити рівномірний контакт робочої поверхні з абразивним середовищем.



а)



б)

Рис. 2.3. Конструкція валу-тримача лабораторної установки: загальний вигляд (а) і розібране виконання (б).

Експериментальні дослідження виконували у виробничих умовах сільськогосподарського товариства з обмеженою відповідальністю СТОВ «Ліщинське», розташованого в селі Ліщин Житомирського району Житомирської області (рис. 2.4). Проведення досліджень у зазначених умовах забезпечило врахування реальних агротехнічних та експлуатаційних факторів, характерних для господарств регіону, що дозволило отримати достовірні результати щодо працездатності та зносостійкості досліджуваних робочих органів.



Рис. 2.4. Загальний вигляд посівного комплексу Väderstad Rapid A 800 C в умовах МТП СТОВ «Ліщинське».

Інтенсивність абразивного зношування робочих органів посівних комплексів оцінювали за величиною втрати маси та зміною їх геометричних параметрів. Втрату маси визначали методом зважування із застосуванням електронних ваг VAGAR VB-P 500 LCD, що забезпечує необхідну точність вимірювань.

Контроль змін геометричних розмірів здійснювали з використанням спеціально розробленого трафарету. Для цього зношений диск встановлювали у відповідне посадочне положення трафарету та виконували його фотозйомку. Подальшу обробку отриманих зображень здійснювали за допомогою прикладного програмного забезпечення на персональному комп'ютері, що дозволяло визначити характер і величину лінійного зношування робочої поверхні з високою точністю.

Планування експериментальних досліджень, вибір режимів випробувань та послідовність їх проведення виконували відповідно до положень загальновідомої теорії експерименту та методів обробки експериментальних даних, наведених у наукових джерелах [12–14].

### **Висновки по розділу**

З метою обґрунтування оптимального вибору матеріалів для виготовлення робочих органів посівних комплексів, а також зміцнюючих покриттів, що забезпечують підвищення їх довговічності та зносостійкості, у роботі розроблено спеціалізовану методику експериментальних досліджень.

Для скорочення матеріальних витрат на проведення тривалих і вартісних експлуатаційних випробувань, а також для зменшення тривалості експерименту з визначення зносостійкого ряду матеріалів і зміцнюючих покриттів, створено лабораторну установку, що працює за методом «гільзи» та дозволяє моделювати процес абразивного зношування в умовах, наближених до реальної експлуатації.

Експлуатаційні випробування проводили у реальних виробничих умовах на робочих органах посівного комплексу Väderstad Rapid A 800, що забезпечило достовірність отриманих результатів і можливість їх практичного використання при виборі матеріалів та технологій зміцнення робочих органів посівних машин.

### РОЗДІЛ 3

#### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

За результатами проведених лабораторних випробувань встановлено, що в процесі зношування дослідних зразків у абразивному середовищі на їхній фрикційній поверхні не спостерігалось характерних слідів мікрорізання, таких як глибокі подряпини або борозни. Поверхня тертя після випробувань мала згладжений, частково полірований вигляд, що свідчить про домінування механізмів полідеформаційного руйнування матеріалу над процесами різання абразивними частинками.

Переважає полідеформаційний механізм зношування обумовлює пластичне переміщення матеріалу поверхневого шару з утворенням наклепаної структури, яка в подальшому поступово руйнується без інтенсивного відриву металу. Такий характер зношування є типовим для умов низьконапруженого абразивного контакту і свідчить про достатню твердість та зносостійкість досліджуваних матеріалів і наплавлених покриттів.

Узагальнені результати лабораторних досліджень зносостійкості дослідних зразків наведено на рис. 3.1.

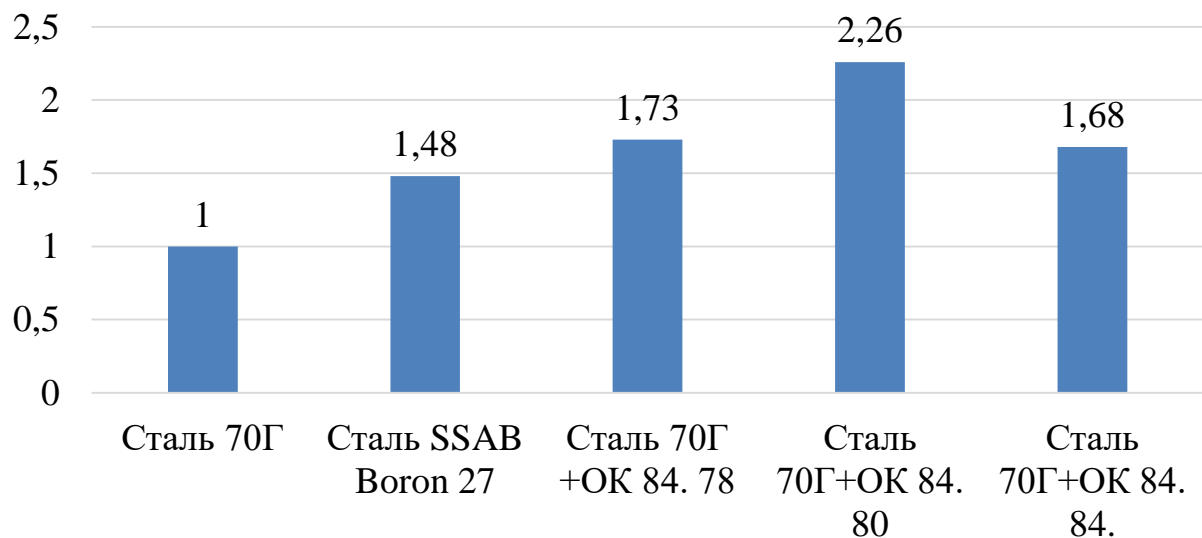


Рис. 3.1. Відносна абразивна зносостійкість матеріалів і наплавлених зносостійких сплавів.

Аналіз результатів, наведених на рисунку 3.1, свідчить про те, що найвищий рівень зносостійкості серед досліджуваних матеріалів демонструє сталь 70Г із нанесеним зносостійким наплавленим шаром електрода ОК 84.80. Отримані результати вказують на суттєву перевагу даного матеріально-технологічного поєднання порівняно як з базовими сталями без зміцнення, так і з іншими типами наплавлених покриттів.

Підвищена зносостійкість зазначеного зразка насамперед обумовлена високою твердістю сформованого наплавленого шару, що підтверджується результатами вимірювань, представленими на рисунку 3.2. Високі значення твердості сприяють зменшенню глибини проникнення абразивних частинок у поверхневий шар матеріалу, що, у свою чергу, призводить до зниження інтенсивності пластичної деформації та уповільнення процесів абразивного зношування.

Таким чином, застосування електрода ОК 84.80 для наплавлення зносостійкого шару на сталь 70Г є технологічно доцільним і забезпечує істотне підвищення експлуатаційної довговічності робочих органів посівних комплексів.

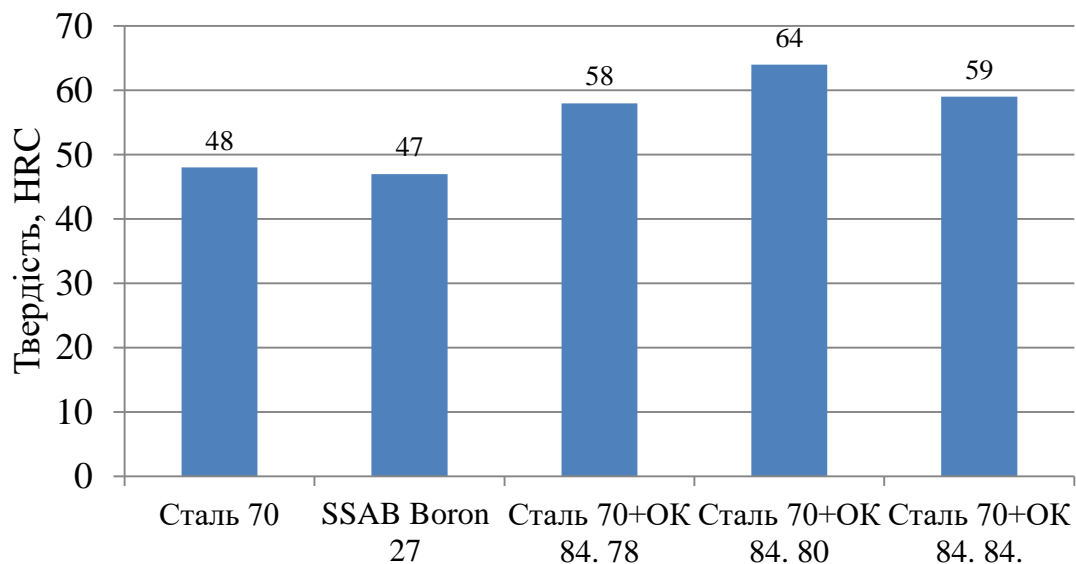


Рис. 3.2. Порівняльні показники твердості дослідних матеріалів

Найвищі значення твердості за результатами експериментальних досліджень зафіксовано у зразків зі зносостійким наплавленим шаром, сформованим електродом ОК 84.80, що безпосередньо зумовило їх максимальну

стійкість до абразивного зношування. Підвищена твердість поверхневого шару обмежує проникнення абразивних частинок у матеріал та зменшує інтенсивність пластичної деформації, що сприяє уповільненню процесів зношування.

Протилежна тенденція спостерігалася для зразків зі сталі 70Г та сталі SSAB Boron 27. Незважаючи на достатньо високі показники механічної міцності, ці матеріали продемонстрували нижчу стійкість до абразивного зношування порівняно зі зміцненими зразками, що в першу чергу пов'язано з особливостями їх мікроструктури та хімічного складу. Для сталі 70Г характерна структура, яка за умов абразивного навантаження сприяє розвитку пластичної деформації та локального руйнування поверхневого шару.

Мікроструктура сталі SSAB Boron 27 відзначається дрібнозернистою будовою без наявності виражених структурних конгломератів або грубих карбідних включень (рисунок 3.3), що позитивно впливає на її загальні механічні властивості, однак в умовах інтенсивного абразивного зношування не забезпечує такого рівня зносостійкості, як у випадку застосування наплавлених зносостійких покриттів.

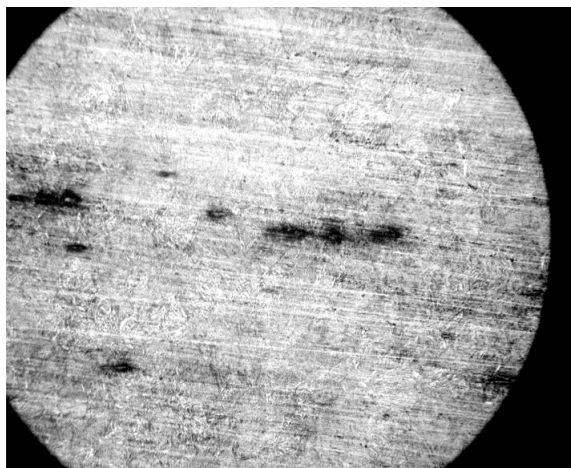


Рис. 3.3. Фото мікроструктури зразка SSAB Boron 27.

Експлуатаційні дослідження виконували у виробничих умовах сільськогосподарського товариства з обмеженою відповідальністю СТОВ «Ліщинське», розташованого в селі Ліщин Житомирського району Житомирської області. Дослідження проводили з використанням посівного комплексу Väderstad Rapid A 800 C, що дало змогу оцінити роботу та

зносостійкість досліджуваних сошників за реальних умов експлуатації, характерних для сучасних технологій сівби.

Під час проведення експериментів використовували комплект сошників різного конструктивного та матеріального виконання, які безпосередньо взаємодіяли з ґрунтовим середовищем у процесі сівби. Загальний вигляд сошників, задіяних у дослідженнях, наведено на рис. 3.4.



а)



б)

Рис. 3.4 Зовнішній вигляд Väderstad Rapid A 800 C: внутрішня поверхня (а) та зовнішня поверхня (б).

На рисунку 3.5 подано результати експериментальних досліджень відносної зносостійкості дисків сошника посівного комплексу Väderstad Rapid A 800 C.

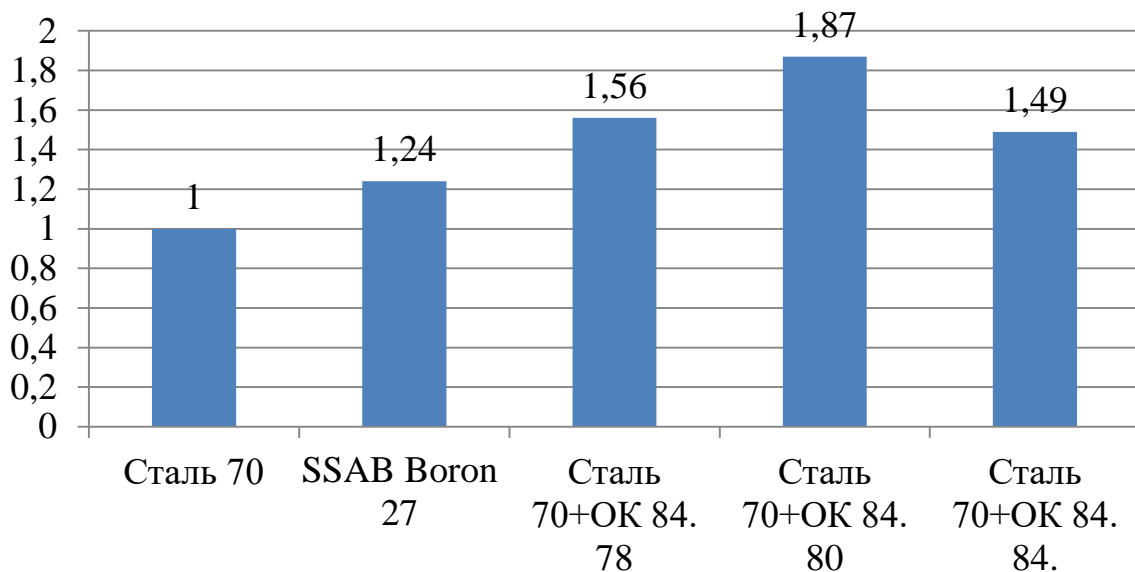


Рис. 3.5. Експериментальні результати оцінювання відносної зносостійкості сошників посівного комплексу Väderstad Rapid A 800 C

Отримані результати експлуатаційних досліджень у повній мірі підтверджують висновки, зроблені на основі лабораторних випробувань. Зокрема встановлено, що найвищу зносостійкість серед досліджуваних матеріалів демонструє сталь 70Г із нанесеним зносостійким наплавленим шаром, сформованим електродом ОК 84.80. Це свідчить про стабільність та ефективність даного матеріально-технологічного поєднання як у контрольованих лабораторних умовах, так і в реальному виробничому середовищі.

Водночас загальне зниження рівня відносної зносостійкості наплавлених матеріалів у процесі експлуатаційних випробувань порівняно з лабораторними дослідженнями зумовлене більш агресивним характером абразивного середовища в польових умовах. У реальній експлуатації абразивні частинки ґрунту перебувають у більш закріпленому стані, що підвищує їх ріжучу здатність, а також додатково проявляється хімічний фактор впливу ґрунтового середовища, який інтенсифікує процеси абразивно-корозійного зношування поверхні сошників.

Під час експлуатаційних досліджень також виявлено конструктивну особливість сошника, яка призводить до прискореного зношування його внутрішньої поверхні. Зокрема встановлено, що чистик сошника виготовлений з того самого матеріалу, що й дисковий сошник (рисунок 3.6). За таких умов у процесі роботи між поверхнями сошника і чистика відбувається закріплення абразивних частинок ґрунту, що спричиняє розвиток процесів мікрорізання і, відповідно, інтенсивне локальне зношування внутрішньої поверхні диска (рисунок 3.7).

На відміну від внутрішньої поверхні, на зовнішній стороні дискового сошника переважаючим механізмом зношування є полідеформаційне руйнування поверхневого шару матеріалу (рисунок 3.8), що обумовлено меншою фіксацією абразивних частинок і їх вільнішим переміщенням у ґрунтовій масі. Така різниця в механізмах зношування підтверджує суттєвий вплив конструктивних та контактних умов роботи сошника на характер і інтенсивність його спрацювання.



Рис. 3.6. Загальний вигляд чистика сошника



Рис. 3.7. Характерні ознаки мікрорізання робочої поверхні під дією ґрунтових абразивів.



Рис. 3.8. Характер полідеформаційного руйнування поверхні сошника

З метою запобігання розвитку процесів мікрорізання на робочій поверхні сошника посівного комплексу доцільно застосовувати для виготовлення чистика матеріал із нижчою твердістю порівняно з матеріалом дискового сошника.

Використання більш «м'якого» матеріалу забезпечує зменшення ймовірності жорсткої фіксації абразивних частинок у зоні контакту між чистиком і сошником, що, у свою чергу, знижує інтенсивність різального впливу ґрунтових абразивів на поверхневий шар робочого органу.

Такий конструктивно-матеріальний підхід сприяє зміні домінуючого механізму зношування з мікрорізального на полідеформаційний, який характеризується меншою швидкістю втрати матеріалу та підвищеною довговічністю сошника в умовах експлуатації. Застосування чистиків із менш твердих сталей або полімерних матеріалів є технічно обґрунтованим рішенням для підвищення ресурсу дискових сошників посівних комплексів.

### **Висновки по розділу**

За результатами проведених лабораторних та експлуатаційних досліджень встановлено, що найвищу стійкість до абразивного зношування демонструє сталь 70Г із нанесеним зносостійким наплавленим шаром, сформованим електродом ОК 84.80. Зазначене матеріально-технологічне поєднання забезпечує стабільно високі показники зносостійкості як у контрольованих умовах лабораторних випробувань, так і під час роботи у реальному ґрунтовому середовищі.

Застосування зносостійкого наплавленого шару на робочій поверхні сошника дозволяє підвищити його зносостійкість у 1,87 раза порівняно з базовим матеріалом без зміцнення, що свідчить про високу ефективність обраної технології наплавлення з точки зору підвищення експлуатаційної довговічності робочих органів посівних комплексів.

Разом із цим, для запобігання розвитку процесів мікрорізання на поверхні сошника в зоні контакту з чистиком доцільно використовувати матеріали з нижчою твердістю для виготовлення елементів очищення. Застосування більш «м'яких» матеріалів зменшує ймовірність закріплення абразивних частинок між

контактуючими поверхнями, що сприяє переходу домінуючого механізму зношування від мікрорізального до полідеформаційного та, відповідно, забезпечує додаткове підвищення ресурсу сошника в умовах експлуатації.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У ході лабораторних досліджень було визначено стійкість до абразивного зношування зразків, виготовлених зі сталі SSAB Boron 27, сталі 70Г, а також зразків зі сталі 70Г із нанесеними зносостійкими наплавленими покриттями, сформованими методом ручного дугового зварювання з використанням електродів марок ОК 84.78, ОК 84.80 та ОК 84.84. Проведені випробування дозволили здійснити порівняльну оцінку впливу матеріалу основи та типу наплавленого шару на інтенсивність абразивного зношування.

За результатами лабораторних досліджень встановлено, що найвищі показники зносостійкості продемонстрували зразки зі сталі 70Г з нанесеним зносостійким покриттям електродом ОК 84.80, що підтверджує доцільність застосування даного електрода для зміцнення робочих поверхонь, які працюють в умовах інтенсивного абразивного навантаження.

З метою підтвердження достовірності отриманих лабораторних результатів та оцінки довговічності робочих органів у реальних умовах експлуатації були проведені експлуатаційні випробування з визначення зносостійкості та ресурсу робочих органів посівного комплексу Väderstad Rapid A 800 C. Для кожного дослідного варіанта було виготовлено по п'ять зразків робочих органів, які встановлювали на посівний комплекс восени 2025 року та експлуатували у виробничих умовах.

Результати експлуатаційних випробувань повністю підтвердили висновки лабораторних досліджень щодо ефективності вибору матеріалів основи та зносостійких наплавлених покриттів для забезпечення підвищеної довговічності робочих органів посівних комплексів.

У процесі проведення досліджень також було виявлено конструктивну особливість чистика сошника, яка призводила до інтенсифікації процесів абразивного зношування робочої поверхні диска. У зв'язку з цим обґрунтовано доцільність використання більш «м'якого» матеріалу для виготовлення чистика

робочого органу, що дозволяє зменшити закріплення абразивних частинок у зоні контакту та підвищити загальний ресурс сошника в умовах експлуатації.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аулін В. В., Голуб Д. В., Лисенко В. Ф. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин : монографія. Кропивницький : Лисенко В. Ф., 2017. 278 с.
2. Борак К. В. Підвищення зносостійкості робочих органів дискових ґрунтообробних знарядь методом електроерозійної обробки : дис. ... канд. тех. наук : 05.02.04 / Житомирський національний агроекологічний університет. Житомир, 2013. 217 с.
3. Соловйов С.А. Комбіновані зміцнювальні покриття для доліт анкерних сошників. Технічний сервіс АПК, 2014, №2, с.108–117
4. Борак К. В. Комплексний підхід підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.05.11 / Поліський національний університет, м. Житомир. 2021. 380.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Hatis A. et al. Influence of local soil conditions on mouldboard ploughshare abrasive wear. Tribology Int., 2008, 41(3): 151–157
9. 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.

10. 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.
11. Rosu B. et al. Disc Openers for Seeding Machines: Physical Parameters and Wear in Field Conditions. *Agriculture*, 2024, 14(7):1066
12. Borak, K. V., Kulykivskiy V. L. Borovskiy V. M. Rudenko V. G., Dobranskiy S. S. Increasing the wear resistance of the working bodies of tillage machines by electrical discharge machining. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. Випуск 3 (48) 2025. Технічні науки. С.149-160.
13. Yazıcı A. Wear on steel tillage tools: A review of material, soil and dynamic conditions // *Tribology in Industry*. 2022. Vol. 44, No. 3. P. 321–334.
14. Holmberg K., Matthews A. *Coatings tribology: Properties, techniques and applications*. Amsterdam : Elsevier, 2009. 560 p.
15. SSAB. SSAB Boron 27 – Technical data sheet. Oxelösund : SSAB AB, 2020. 6 p.
16. ESAB. Covered electrodes OK 84.78, OK 84.80, OK 84.84. Technical specification. Göteborg : ESAB, 2019. 8 p.
17. ISO 6508-1:2016. Metallic materials. Rockwell hardness test. Part 1: Test method. Geneva : ISO, 2016.
18. Нагребецький Д. В. Абразивні властивості ґрунтового середовища. Збірник тез доповідей XII Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання» з нагоди 118-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, віцепрезидента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906-1987) 20-21 лют. 2025 р., м. Київ / МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. К.: Видавничий центр НУБіП України, 2025. С. 73-75.
19. Дерев'янюк Д. А., Нагребецький Д.В., Добранський С. С., Руденко В. Г., Мельник О. П. Підвищення надійності ґрунтообробних машин. Збірник тез доповідей XI Міжнародної науково-практичної конференції "Перспективи і

тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь. РТDSTSAMT-2025" з нагоди 30-річчя започаткування підготовки ОС "Бакалавр" за спеціальністю "Агроінженерія" 11 квітня 2025 року МОН України. Житомирський агротехнічний фазовий коледж. Житомир. 2025. С. 92-93. <https://doi.org/10.64165/proceeding-ptdstsamt.2025>.

20. Герасимчук Д.В., Шевчук О.А., Польовий А.В., , Нагребецький Д.В. Методи підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали V Міжнар. наук.-практ. конференції молодих учених (Запоріжжя, 03-28 лютого 2025 р.). Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. С. 111-112.