

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

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Зінченко Роман Олегович

УДК 631.312:620.178.16:621.9

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СІВАЛОК
ПРЯМОГО ВИСІВУ**

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
_____ Зінченко Р.О.

Керівник роботи

Міненко С.В.

кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Зінченко Роман Олегович. Підвищення надійності сівалок прямого висіву. – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

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

Магістерська робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної задачі підвищення зносостійкості та експлуатаційного ресурсу доліт стерньових сівалок шляхом удосконалення матеріалу та технології їх виготовлення. У роботі обґрунтовано доцільність заміни традиційних вуглецевих і малолегованих сталей литими виробами із сірого та високоміцного чавуну як більш технологічного та економічно ефективного конструкційного матеріалу для умов серійного виробництва.

Виконано комплекс теоретичних, лабораторних і польових досліджень, спрямованих на формування зносостійкого відбіленого шару з оптимальними структурно-механічними характеристиками. Встановлено раціональний розподіл твердості та мікроструктури по функціональних зонах долота залежно від умов навантаження. Доведено можливість отримання заданого градієнта властивостей у виробках із високоміцного чавуну з використанням одного циклу об'ємного нагріву.

Результати польових випробувань підтвердили істотне зростання ресурсу доліт із чавуну ВЧ50 після лазерного оплавлення робочої поверхні та з чавуну СЧ20 після загартування струмами високої частоти з оплавленням. Отримані показники зносостійкості у 3,6–4,02 рази перевищують аналогічні характеристики серійних доліт зі сталі 65Г, що свідчить про високу ефективність запропонованих технологічних рішень та їх практичну значущість для аграрного машинобудування.

Ключові слова: долото стерньової сівалки; зносостійкість; високоміцний чавун; сірий чавун; відбілений шар; лазерна термічна обробка; загартування СВЧ; абразивний знос.

ANNOTATION

Zinchenko Roman Olehovych. Improving the Reliability of Direct Seeding Drills. – *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 master's thesis is devoted to solving a relevant scientific and applied problem of increasing the wear resistance and service life of stubble seeder chisels by improving the material selection and manufacturing technology. The study substantiates the feasibility of replacing conventional carbon and low-alloy steels with cast components made of gray and ductile iron as more technologically advanced and economically efficient structural materials for serial production.

A comprehensive set of theoretical, laboratory, and field investigations was carried out, aimed at forming a wear-resistant white-hardened surface layer with optimal structural and mechanical characteristics. A rational distribution of hardness and microstructure across the functional zones of the chisel was established depending on the loading conditions. The possibility of obtaining a predetermined gradient of properties in ductile iron components using a single cycle of bulk heating was experimentally confirmed.

The results of field tests demonstrated a significant increase in the service life of chisels made of ductile iron VCh50 after laser surface melting and of gray iron SCh20 after high-frequency induction hardening combined with surface melting. The obtained wear resistance values exceed those of serial chisels made of 65G steel by 3.6–4.02 times, which confirms the high efficiency of the proposed technological solutions and their practical relevance for agricultural machinery engineering.

Keywords: stubble seeder chisel; wear resistance; ductile iron; gray cast iron; white-hardened layer; laser heat treatment; induction hardening; abrasive wear.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	10
РОЗДІЛ 2. ОРГАНІЗАЦІЯ ТА МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	24
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	34
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	42
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	44

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасний розвиток аграрного виробництва в Україні та світі характеризується активним упровадженням ресурсозберігаючих технологій обробітку ґрунту, серед яких провідне місце займає технологія прямого висіву (No-Till). Ефективність застосування таких технологій значною мірою залежить від надійності та працездатності сівалок прямого висіву, які працюють у складних експлуатаційних умовах, зокрема на полях із високою щільністю ґрунту, значною кількістю пожнивних решток та підвищеним абразивним зношуванням робочих органів.

У процесі експлуатації сівалок прямого висіву найбільшому навантаженню піддаються робочі органи сошникових секцій, елементи заглиблення та ущільнення, а також вузли кріплення і шарнірні з'єднання. Інтенсивне абразивне та ударне зношування цих елементів призводить до зниження стабільності глибини загорання насіння, погіршення якості сівби, зростання енерговитрат і частоти простоїв машин через ремонти. У результаті зменшується загальна надійність сівалок і підвищуються експлуатаційні витрати, що негативно впливає на економічну ефективність виробництва сільськогосподарської продукції.

Незважаючи на наявність значної кількості наукових досліджень, спрямованих на вдосконалення конструкцій сівалок та їх робочих органів, питання підвищення надійності машин прямого висіву залишається актуальним. Більшість серійних конструкцій виготовляється з традиційних сталей без урахування можливостей сучасних матеріалів і технологій зміцнення, що обмежує їх довговічність у важких ґрунтово-кліматичних умовах. Особливо гостро ця проблема проявляється в умовах України, де значна частина орних земель характеризується підвищеною абразивністю ґрунтів і нерівномірними умовами зволоження.

У зв'язку з цим актуальним є проведення комплексних досліджень, спрямованих на підвищення надійності сівалок прямого висіву шляхом удосконалення матеріалів, конструкцій і технологій зміцнення найбільш навантажених елементів. Реалізація таких підходів дає змогу забезпечити стабільну якість сівби, збільшити ресурс машин, знизити витрати на технічне обслуговування та ремонт, а також підвищити конкурентоспроможність вітчизняної сільськогосподарської техніки.

Таким чином, тема магістерської роботи, присвячена підвищенню надійності сівалок прямого висіву, є своєчасною, науково обґрунтованою та має важливе практичне значення для розвитку сучасного аграрного виробництва.

Метою магістерської роботи є підвищення надійності та експлуатаційного ресурсу доліт стерньових сівалок шляхом обґрунтування доцільності застосування литих робочих органів із сірого та високоміцного чавуну, а також розроблення та експериментальної перевірки ефективних технологічних режимів термічного і локального зміцнення, що забезпечують формування оптимального розподілу структурно-механічних властивостей за функціональними зонами долота.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити такі основні **завдання:**

Проаналізувати сучасні конструкції та матеріали, що застосовуються для виготовлення доліт стерньових сівалок, та визначити основні причини їх зношування і втрати працездатності в умовах прямого висіву.

Обґрунтувати доцільність використання сірого та високоміцного чавуну як конструкційного матеріалу для доліт з урахуванням вимог до надійності, технологічності та економічної ефективності серійного виробництва.

Дослідити вплив хімічного складу високоміцного чавуну (вмісту марганцю, кремнію та кремнієвого еквівалента) на формування зносостійкого відбіленого шару та структурного стану матеріалу.

Розробити та обґрунтувати режими термічної і комбінованої обробки, що забезпечують раціональний розподіл твердості та мікроструктури по функціональних зонах долота.

Визначити оптимальні значення твердості та структури для робочої, перехідної та зони кріплення долота з позицій забезпечення високої зносостійкості та експлуатаційної надійності.

Провести лабораторні дослідження абразивної зносостійкості доліт, виготовлених із сірого та високоміцного чавуну і зміцнених різними технологічними методами, у порівнянні з серійними зразками зі сталі 65Г.

Об'єктом дослідження: робочі органи долотоподібного сошника сівалки – долота, виготовлені з високоміцного чавуну та піддані подальшій термічній обробці.

Предмет дослідження: закономірності зміни структурного стану, зносостійких властивостей і довговічності литих чавунних доліт сошника зернової сівалки залежно від застосування термічних режимів та технологій локального оплавлення, у зіставленні з експлуатаційними характеристиками серійного долота, виготовленого зі сталі 65Г.

Методи дослідження. У процесі виконання магістерської роботи використано комплекс взаємодоповнювальних методів дослідження, що забезпечили всебічну оцінку властивостей матеріалів і ефективності запропонованих технологічних рішень. Теоретичні дослідження ґрунтувалися на аналізі науково-технічної літератури, нормативної документації та сучасних підходів до підвищення зносостійкості і надійності робочих органів сільськогосподарських машин.

Експериментальні лабораторні дослідження включали металографічний аналіз мікроструктури зразків сірого та високоміцного чавуну після різних режимів термічної та комбінованої обробки з використанням оптичної мікроскопії. Визначення твердості матеріалів проводили методами Брінеля,

Роквелла та Віккерса з урахуванням зонального розподілу властивостей по перерізу доліт.

Оцінювання зносостійкості виконували шляхом лабораторних випробувань на абразивне зношування на торцевій машині тертя відповідно до вимог державних стандартів, із визначенням масового зносу та відносної зносостійкості. Для підтвердження результатів лабораторних досліджень проведено натурні польові випробування експериментальних доліт у складі стерньових сівалок в умовах реальної експлуатації, з контролем напрацювання, зміни геометричних параметрів і моменту досягнення граничного зносу.

Обробку та узагальнення експериментальних даних здійснювали із застосуванням методів порівняльного аналізу, графічної інтерпретації результатів і статистичної обробки, що забезпечило достовірність і обґрунтованість отриманих висновків.

Перелік **публікацій** за темою роботи:

1. Куликівський В.Л., Дармограй М.М., Зінченко Р.О. Конструкція та функціонування запропонованого висівного апарату. 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. 153-156.

2. Бистрицький Б., Кушим Р., Зінченко Р., Куликівський В. Робочі органи сівалок для прямого посіву. Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості: збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Кам'янець-Подільський, 16 жовтня 2025 року). Кам'янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. С. 55-63.

2. Зінченко Р. О., Бистрицький Б. П. Методи та способи підвищення надійності сошників зернових сівалок. Наукові читання – 2025: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і

спеціальностей. 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Том 2. С. 59-61.

Практичну значимість Практичне значення магістерської роботи полягає в обґрунтуванні та експериментальному підтвердженні можливості підвищення надійності й ресурсу доліт стерньових сівалок шляхом заміни традиційних сталевих робочих органів литими виробами із сірого та високоміцного чавуну з локально зміцненою робочою поверхнею.

Розроблені та перевірені режими термічної, СВЧ- та лазерної обробки дозволяють формувати раціональний градієнт твердості та мікроструктури за функціональними зонами долота, що забезпечує збільшення експлуатаційного ресурсу робочих органів у 3,6–4,02 рази порівняно із серійними зразками зі сталі 65Г. Запропоновані технологічні рішення можуть бути безпосередньо впроваджені у серійне виробництво доліт для сівалок прямого висіву без істотної зміни існуючої виробничої бази.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 26 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 46 сторінок комп'ютерного тексту, містить 16 рисунки та 2 таблиці.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Робочі органи сівалок для прямого посіву

Метод прямого посіву або No-till передбачає висівання насіння без традиційного передпосівного обробітку. Відсутність оранки зберігає структуру ґрунту, запобігає ерозії та економить паливо, але істотно змінює умови роботи посівної техніки. Основним елементом, який забезпечує утворення борозни й укладання насіння, є сошник. Він повинен розрізати покрив рослинних решток, розсунути ґрунт на потрібну глибину, тимчасово утримати борозну відкритою для висіву і забезпечити загортання насіння [1]. Правильно підібраний сошник дозволяє отримати дружні сходи та стабільний урожай. Сучасні дослідження пропонують різні конструкції робочих органів, які відрізняються формою борозни, матеріалом і методами підвищення зносостійкості [2].

Практика прямого посіву показала, що найважливішою характеристикою сошника є форма поперечного перерізу борозни. Від кута входження і геометрії робочої частини залежить мікроструктура ґрунту, що впливає на проростання зерна. Сошники з тупим кутом входження переміщують ґрунт зверху вниз і ущільнюють дно борозни, тоді як з гострим кутом – піднімають ґрунт знизу вгору, а з прямим – відсовують його у сторони [1]. Поширеними формами борозен є V-подібна, U-подібна та перевернута T-подібна [1]. Вимоги до робочого органа включають здатність формувати очищену від рослинних решток борозну, утримувати постійну глибину висіву, працювати із тиском до 20 км/год, очищуватися від налипання і мати великий ресурс служби [2].

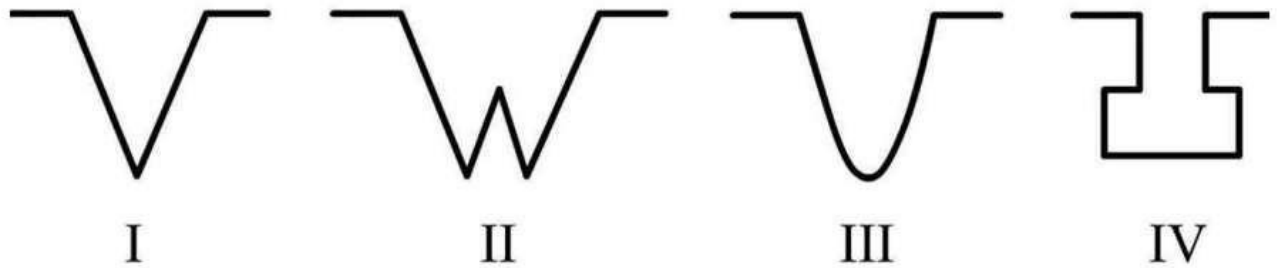


Рис. 1.1. Форми борозен: I – V-подібна, II – W-подібна, III – U-подібна, IV – перевернута, T-подібна [2].

Однодисковий сошник – найпростіший робочий орган для прямого посіву. Він складається з вертикального або злегка нахилоного диска, який розрізає рослинні рештки та створює вузьку борозну. У сівалках використовують зубчасті або опуклі диски; нахил $3-7^\circ$ полегшує проникнення та частково зміщує рослинні рештки. Переваги однодискових сошників: хороша придатність для сівби по мульчі, мінімальне технічне обслуговування і проста конструкція. Недоліком є односторонній тиск на навіску, що через деякий час викликає нерівномірну глибину висіву та можливу появу «подвійного ряду» між сусідніми робочими органами. Окремі виробники оснащують такі сошники прикочувальними колесами для стабілізації глибини [1].



Рис. 1.2. Секція з однодисковим сошником сівалки Väderstad [2].

Дводисковий сошник є найбільш поширеним робочим органом на зернових і зернотрав'яних сівалках. Він має литий корпус з двома дисками, що сходяться під кутом і утворюють V-подібний клин. Під час руху диски розсувають ґрунт у різні боки, утворюючи борозну, але всередині між дисками може виникати W-подібний профіль дна, що призводить до нерівномірного розміщення насіння. Такий сошник добре працює у важких ґрунтах з великою кількістю рослинних решток, забезпечуючи загортання насіння на глибину до 9 см. Основні недоліки: частина насіння торкається внутрішніх поверхонь дисків і викидається на поверхню, що знижує рівномірність висіву; у вологому ґрунті можливе налипання і забивання дисків. Для покращення розподілу насіння пропонують встановлювати між дисками нерухому п'ятку та напрямні щоки [1-2].

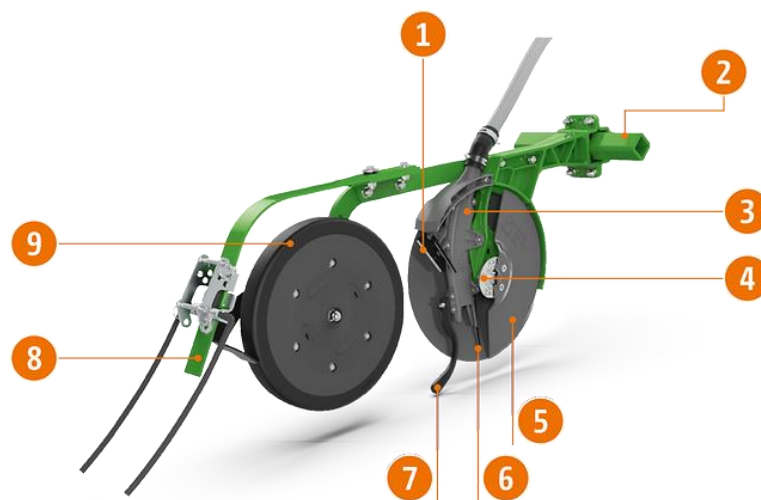


Рис. 1.3. Секція з дводисковим сошником сівалки AMAZONE [3]: 1 – внутрішні скребки, 2 – гідравлічне регулювання тиску сошників від 0 до 100 кг, 3 – змінне направляюче обладнання для насіння, 4 – підшипники, що не потребують обслуговування, без точок змащення на сошнику, що не потребує обслуговування, 5 – подвійний диск \varnothing 380 мм, кут 10° , 6 – подовжувач направляючої, 7 – уловлювач насіння, 8 – висівний шкребок з регульованим кутом, 9 – тримач колеса з катком контролю глибини Control+ шириною 50, 65 або 75 мм [2].

У модифікаціях, де диски розташовані під кутом до напрямку руху, дводискові сошники формують V-подібну борозну, але дозволяють краще управляти рослинними рештками. Один диск може випереджати інший, утворюючи ріжучий край і запобігаючи забиванню мульчею. Існують варіанти з дисками різного діаметра або з додатковим третім диском; останній розрізає рослинні рештки перед основними дисками й зменшує вдавлювання залишків у насінневе ложе. Переваги вертикальних дводискових і тридискових сошників полягають у простоті конструкції, низьких витратах на обслуговування та здатності проникати крізь рослинні рештки. Серед недоліків відзначають велику потребу в тяговому зусиллі, схильність до ущільнення ґрунту та погану здатність розділяти насіння і добрива [2].

Анкерний тип представляє собою вузький виступ чи лапу, що проникає у ґрунт. Насіння подається через порожнину в середині анкера або по трубці, приєднаній ззаду. Під час роботи анкер викидає ґрунт вгору, формуючи U-подібну борозну. Переваги анкерних сошників – відносно низька вартість, можливість одночасного висіву насіння та добрив і відсутність затискання рослинних решток. До недоліків належать швидке зношування, погана керованість рослинними рештками, розмазування вологого ґрунту та обмежена робоча швидкість (6–9 км/год) [2].

Сошники з індивідуальним приводом є мініатюрними обертовими культиваторами. Кожен ротор утворює U-подібну борозну, змішуючи насіння або добрива із ґрунтом [1]. У сучасних конструкціях ножі монтують парами; іноді вони працюють разом із розрізаючим хвилястим диском, розміщеним перед ротором. Перевагами є здатність працювати на ділянках, де інші сошники не справляються (наприклад, на перезволожених пасовищах), змішування рослинних решток із ґрунтом і невелика сила проникнення. Серед недоліків – складність конструкції, швидке зношування обертових частин та погане розділення насіння і добрив [2].

Дисково-анкерні сошники поєднують переваги диска й анкера й створюють перевернуту Т-подібну борозну. Найвідомішою реалізацією є система Cross Slot®, розроблена на основі 30-річних досліджень в університеті Мейсі. Відмінність цієї технології полягає у горизонтальній борозні: вертикальний ріжучий диск робить проріз, а за ним крило-анкер утворює дві горизонтальні полиці, куди роздільно подаються насіння та добрива. Посівний матеріал розташовується під горизонтальним крилом ґрунту; це гарантує надійне покриття насіння та захист від пересихання. Cross Slot® здатний працювати у великих пожнивних рештках, окремо вносити насіння і добрива, підтримувати сталу глибину завдяки індивідуальним гідроциліндрам і створювати просторовий бар'єр між добривом і насінням. Серед переваг також універсальність щодо типів ґрунтів, відсутність забивання та можливість працювати без попереднього вирівнювання поля [2].

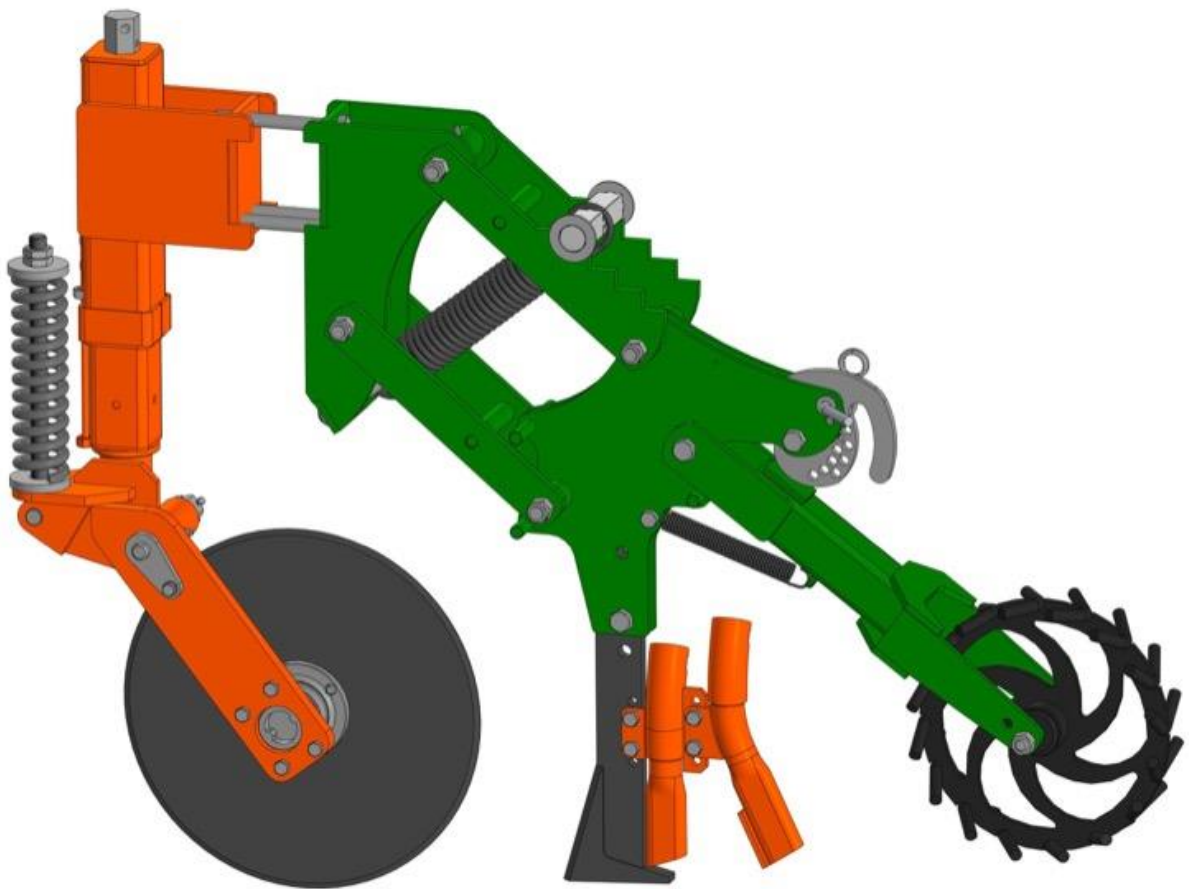


Рис. 1.4. Посівна секція з анкерним сошником [2].



Рис. 1.5. Дискowo-анкерний сошник Cross Slot

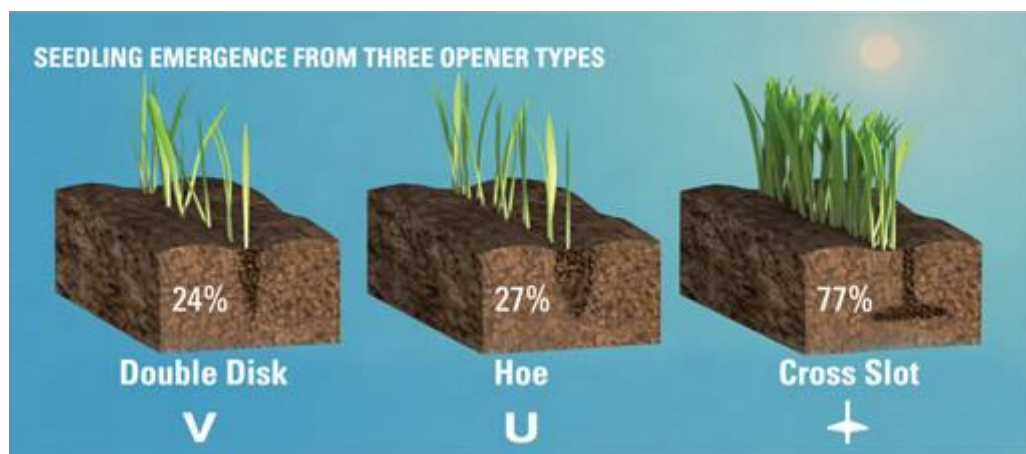


Рис. 1.6. Порівняння системи Cross Slot зі стандартними системами посіву.

Матеріал робочих органів повинен забезпечувати високу зносостійкість, міцність і здатність протистояти корозії. Для вітчизняних сівалок сошники виготовляють із вуглецевої пружинної сталі 65Г або замінників – сталі М76 чи 45, які після термічної обробки мають твердість 39–44 НРС. Іноземні виробники застосовують леговані борвані сталі: наприклад, фірма Bellota

використовує сталь 28MnB5, а компанія Case IH – власну марку Earth Metal [4]. У дослідженні з ремонту сошників Kverneland Optima HD та Kuhn Planter відзначено, що деталі зносостійких сталей 30MnB5, Hardox 500 і Hardox 600 мають високу довговічність, а їх поверхнєве наплавлення зносостійкими дротами значно підвищує ресурс [2].

Для підвищення ресурсу робочі органи виготовляють із багатошарових або композитних матеріалів. Біметалеві лемеші трапецієподібної форми виробляють з двошаровою лезовою частиною: тверда сталь X6Ф1 утворює нижній шар, а м'якіша сталь Л-53 – верхній, що забезпечує ефект самозаточування. Імпортні дискові сошники іноді оснащують вставками з тврдосплавних пластин (вольфрамівий карбід) по ріжучій кромці, що на порядок збільшує ресурс [2].

Підвищення зносостійкості сошників є актуальним завданням, оскільки в умовах прямого посіву вони працюють у жорсткому абразивному середовищі. Аналіз літературних джерел свідчить, що напрями підвищення довговічності включають: використання зносостійких матеріалів, багатошарового прокату, термічної та термохімічної обробки, розробку складових (змінних) робочих органів, наплавлення і напилення зносостійкими матеріалами [2].

Звичайне гартування забезпечує твердість 40–46 HRC для сталі 45 і 55–61 HRC для сталі 65Г, проте зносостійкість таких деталей менша порівняно з деталями зі спеціальних сталей. Для підвищення зносостійкості застосовують диференційне загартування, цементацію, нітроцементацію або борування. Термічна обробка комбінується з поверхневим легуванням бором або азотом, що створює тверді зміцнені шари товщиною 1–2 мм. Такі шари суттєво підвищують твердість і стійкість до абразивного зношування [2].

Найпоширенішим способом відновлення та зміцнення сошників є дугове наплавлення. Карбовібродуговий метод із застосуванням вугільного електрода і металокерамічних паст дозволяє одержати покриття з підвищеною твердістю; лабораторні дослідження показали, що таке наплавлення забезпечує зносостійкість у 4,03–10,55 раза вищу, ніж у нового диска з легованої сталі

28MnB5 [4]. Для відновлення деталей із сталей 30MnB5, Hardox 500 та Hardox 600 ефективним є наплавлення порошковими дротами типу ПП-180X9, що підвищує відносну зносостійкість у 7–13 разів [5]. Важливо регулювати висоту та крок наплавлення; комбінація твердих і м'яких ділянок забезпечує самозаточування леза та знижує тяговий опір агрегату [2].

Газотермічне напилення (плазмове чи детонаційне) формує на лезі шар карбідів високої твердості, зменшує час зміцнення і може знизити вартість робіт. До сучасних методів належить лазерна термообробка та лазерне наплавлення. Лазерне зміцнення дисків зі сталі 65Г створює зміцнену зону шириною 15–16 мм; експериментальні диски після лазерної обробки мали менший знос по масі на 31% порівняно з серійними. Лазерне наплавлення сплавом ПС-14-60 + 6% В4С знижує інтенсивність зносу в 1,7–1,8 раза порівняно з індукційним гартуванням [4].

Для збереження геометрії сошників під час роботи використовують локальне дискретне зміцнення. Наприклад, електродугове зміцнення електродом Т620 з нанесенням трьох смуг шириною 10 мм і кроком 15 мм забезпечує кероване зношування й формування зубчастої кромки, що полегшує різання і сприяє самозаточуванню [4]. Застосування двошарових біметалічних деталей (твердий низ — м'який верх) також забезпечує вибіркове зношування: м'який шар стирається швидше, оголюючи твердий ріжучий край. У випадку дисково-анкерних сошників Cross Slot, заводські деталі виготовляють з високоякісних зносостійких матеріалів, а замінні елементи дозволяють швидко ремонтувати робочі органи, зменшуючи простой в полі [2].

Ефективний прямий посів неможливий без адаптованих робочих органів. Аналіз сучасних конструкцій показав, що однодискові сошники відзначаються простотою і хорошим проникненням у мульчу, але можуть викликати нерівномірну глибину висіву. Дводискові та тридискові сошники забезпечують стабільну V-подібну борозну, працюють у широкому діапазоні умов, однак схильні до ущільнення ґрунту й погано розділяють насіння та добрива. Анкерні

сошники формують U-подібну борозну і дозволяють одночасно вносити насіння та добрива, проте швидко зношуються та мають обмежену швидкість. Сошники з індивідуальним приводом і дисково-анкерні системи Cross Slot є перспективними для важких умов: перші змішують рослинні рештки, а другі утворюють перевернуту T-подібну борозну й розділяють насіння і добрива, забезпечуючи оптимальний мікроклімат. Вибір конкретного типу залежить від виду культури, стану поверхні, кількості пожнивних решток та агрокліматичних умов [2].

Матеріали сошників за останні роки еволюціонували від пружинної сталі 65Г до легованих борованих сталей (28MnB5, Hardox 500/600) та композиційних біметалів. Для підвищення зносостійкості використовують термічну та термохімічну обробку, дугове та лазерне наплавлення твердих сплавів, газотермічне напилення й локальні зміцнення, що забезпечують ефект самозаточування. Комплексне застосування цих методів дозволяє збільшити ресурс сошників у декілька разів і мінімізувати простої техніки під час посівної [2].

1.2 Методи та способи підвищення надійності сошників зернових сівалок

Надійність сошника в полі залежить від багатьох факторів. Ґрунтові умови – основний фактор. Абразивні ґрунти з високим вмістом піску чи глини прискорюють стирання матеріалу робочих органів. Рослинні рештки (солома, стерня) можуть засмічувати борозну, змінювати характер контакту насіння з ґрунтом та призводити до «змикання» сошника із зарослями. При цьому залишки стерні можуть викликати нерівномірне зношування (зовнішня поверхня дисків стирається сильніше, ніж центр) [3].

Робочі параметри машин: швидкість руху сівалки і глибина закладення впливають на зусилля проникнення та тертя. Зі збільшенням робочої швидкості зростає сила різання ґрунту і відповідно прискорюється знос кромки. При

глибині закладення надвеликій (чи занадто малій) сошник не відповідає найкращим параметрам роботи, що знижує якість посіву і може спричинити перевантаження вузлів. Також фіксоване робоче навантаження (наприклад, жорсткі пружини або відсутність амортизаторів) робить сошники вразливішими до ударів і тріщин при наїзді на перешкоди [3].

Матеріал та якість виготовлення: важливі умови надійності. Сошники зазвичай виготовляють зі спеціальних високоміцних сталей з підвищеним вмістом марганцю чи бору. Наприклад, компанія Vaderstad використовує власну сталеву марку V-55 (шведська сталь SSAB), що забезпечує твердість ~55 HRC (на 7–8 HRC вище стандарту) та високу стійкість до ударів. Відомо, що сталі C1064 (боруваті) зношуються більш ніж удвічі повільніше за просту C1010 при однакових умовах. Неправильна термообробка або дефекти в металообробці можуть призвести до внутрішніх тріщин і раптових поломок [3].

Корозійні та кліматичні фактори: вологі умови можуть сприяти не лише корозії металу, а й обдиранню ґрунтом (особливо шліфуванню над поверхневою корою). Часта праця по волого-щільному ґрунту прискорює появу іржі та глибшого зношування [3].

Сучасні сошники проєктують із урахуванням зносостійкості. Вибір матеріалів: застосовують леговані сталі (бористі, марганцеві) та навіть порошкові металокорпусні сплави (VDP) для виготовлення робочих частин. Наприклад, нанесення мікрозернистих порошкових покриттів Eutalloy (CrNi-сплав із 60% твердих частинок) методом лазерного напилення або термічного напилення помітно підвищує зносостійкість і корозійну стійкість лез і дисків. Такі покриття (WC-Co-Cr, NiCrBSi тощо) формують надміцний шар, що зменшує абразивний знос на 2–3 рази відносно без покриття. Крім того, легкі металокерамічні сплави та біметалічні конструкції (латунь на карбіді вольфраму) використовуються для змінних наконечників (підошв, «баків») сошників [3].

Геометрія і габарити: оптимізація кута атаки, радіуса, товщини і форми робочих органів дозволяє зменшити механічні навантаження. Наприклад,

симуляції та випробування показали, що збільшення діаметра дискових сошників до ~297–380 мм зі зменшенням кута розходження дисків (до ~14°) забезпечує високу стабільність робочої глибини при низькому зусиллі. Дослідники рекомендують заточувати диски під кутом ~25° і міняти їх при зносі більше 12–14 мм. Важлива також товщина дисків і жорсткість кріплення: чим товщий диск (після закінчення ресурсу), тим довше служить, але він важчий.

Амортизаційні елементи та приводи: впроваджують підпружинені або гідромеханічні кріплення, що дозволяють сошнику відходити при зіткненні з перепоною (трип-механізми), а після зусилля – повертатися в задану позицію. Такі рішення зменшують ризик поломки при ударах. Наприклад, у ґрунтообробній техніці застосовують «Rock-Flex» системи (KUNN) або пружини постійного тиску, що автоматично пристосовують положення сошника під навантаження. Застосовують також електронне регулювання тиску на сошник з кабіни, автоматичну підстройку глибини по нерівностям (ISOBUS SmartForce тощо) [3].

Удосконалення сошників здійснюється і за рахунок нових технологій. Тверді сплави та карбіди: для торцевих пластин та шипів сошників часто використовують наплавлення чи вварювання твердого сплаву (TiC/WC-основи) або приварювання зносостійких пластин (Ni-Hard, VDN тощо). Практика показує, що сошники з твердосплавними наконечниками працюють у 3–4 рази довше, і фермери рекомендують вжарювати або ставити вставки з карбіду вольфраму там, де відбувається основний знос [3].

Зміцнення поверхонь: окрім плазмового та термічного напилення (порошками WC, Al₂O₃, Cr₂O₃ тощо), розробляються методи лазерного легування кромки сошника («self-grinding» плазма-лазером). Такі технології формують сплавлене високоміцне покриття з однорідною мікроструктурою, що при меншому зусиллі різання значно підвищує зносостійкість (експерименти показали, що після 76 годин роботи опуклий ніж із лазерним покриттям залишався гострим довше, ніж звичайний 65Mn ніж). Активно досліджуються

також покриття електродним наплавленням («електродурен» тощо) та вакуумна дугова наплавка (CVD, PACVD) для деталей сошників (зменшують абразію, продовжують ресурс в 2–3 рази) [3].

Адаптивні системи регулювання глибини: для забезпечення стабільної глибини та рівномірного посіву розробляються електронні системи моніторингу і контролю. Сучасні датчики (лазерні, ультразвукові, інерційні) відслідковують становище рам та глибину введення сошників в ґрунт. Наприклад, запропоновано та випробувано мультисенсорну систему, що за допомогою лазера та камери зображень виконує високоточні виміри нерівностей поверхні і кутових нахилів, а потім управляє підняттям/опусканням кожного сошника окремо. Така адаптивна система контролю глибини дозволяє підтримувати стає положення коліс-глибиномірів на нерівних полях: експериментально доведено, що використання алгоритму з урахуванням середнього нахилу ділянки ймовірно забезпечує задану глибину навіть за горбистого рельєфу. Подібні підходи «розумних» сівалок з автопілотом глибини скорочують втрати врожаю, утримуючи насіння на рівномірній глибині [3].

Щоб підтримувати надійність, своєчасне технічне обслуговування є критично важливим. Регулярно перевіряють стан сошників перед сезоном: очищають від забруднень, контролюють кріплення і направляючі, фарбують або фарбують проти корозії, змазують шарніри. Найважливіше – визначити граничний знос робочих деталей. Для дисків сошників використовується простий метод: за допомогою щупа (чи спеціального пристрою) вимірюють товщину диска або просвіт між диском та притискним кільцем. Такі «шаблони зносу» показують, коли диск потрібно замінити. За даними польових досліджень, диски товщиною менше ~366 мм (від початкових 380 мм) вже не забезпечують потрібної глибини і мають бути замінені [3].

Планове технічне обслуговування також включає періодичну змазку рухомих шарнірів, перевірку натягу пружин/гідроамортизаторів, обкатування підшипників кожного сошника. У дилерських інструкціях наголошують на

необхідності чистити та контролювати ходи гвинтів регулювання глибини, а також кріплення ящика з насінням, щоб уникнути ударних навантажень на сошники при перекиданні [3].

Діагностика: крім візуального огляду, використовують тахеометри та датчики кутів для відстеження радіального та тангенціального биття дисків, що може свідчити про нерівномірне зношування чи пошкодження ґрунтозачепів. Зростаюче число «розумних» сівалок обладнано моніторами блокування/пробуксовки (seed flow/occlusion sensors) та реєстраторами глибини по кожному ряду. Хоч вони безпосередньо не вимірюють знос сошника, вони дозволяють виявляти відхилення в роботі (наприклад, якщо одноряд не опускається до заданої глибини під час роботи – можливо, сошник застряг чи розпружинився) [3].

Прогноз ресурсу: базується на нормуванні зносу за напрацьовані години або гектари. У розрахунках раціонально враховувати мінімальний допустимий розмір сошника та підшипників. Наприклад, аналіз розподілу товщини нових дисків показав нормальний розподіл навколо $\sim 4,25$ мм, а після 80 га збирання диски зменшили товщину в середньому до $\sim 3,87$ мм (середнє зменшення – 0,38 мм). З такого експерименту виведена орієнтовна норма: «збивання» товщини $\sim 0,25$ мм за 80 га \rightarrow 1 мм за 320 га, тож заміну рекомендують після ~ 500 га. Подібні емпіричні норми служать основою для планування заміни деталей [3].

Результати наукових досліджень зазвичай підтверджуються польовими тестами. Наприклад, розрахункові моделі нового профілю дисків на сівалках показали в симуляції стабільність глибини 91,6% при певних параметрах; при польових випробуваннях тієї ж конструкції стабільність становила 92,4% – похибка менш ніж 1% від симуляції. Це свідчить, що апроксимація допомагає створити надійні конструкторські рішення. Інші дослідження за допомогою лабораторних стендів і польових випробувань також показали: тверді сплави і напилення справді подовжують ресурс робочих органів. Наприклад, робочі зносіві деталі з пілоелектролітичним чи лазерним покриттям витримують у 2–3

рази більше проходів у ґрунті, ніж звичайні (за даними аналізу зносу плугів і дисків). Інноваційні системи гідрокерування глибини, розроблені на стендах, при полях забезпечили рівномірний посів навіть на схилах та нерівному ґрунті, підтверджуючи практичну користь адаптивного управління [3].

Таким чином, аналіз різноманітних джерел показує: для надійної роботи сошників необхідно комплексне рішення – правильна конструкція та матеріал, застосування сучасних технологій зміцнення, автоматичне регулювання параметрів і регулярний контроль стану. Усунення виявлених недоліків (зношування, заклинювання, поломки) досягається як апробацією нових наукових методів (моделювання, експерименти), так і підтвердженням їх ефективності в реальних польових умовах [3].

Висновки: Знос і відмова сошників зумовлені багатьма факторами (ґрунт, умови роботи, матеріал, конструкція). Наукові дослідження вказують, що підвищити їх надійність можна за рахунок вибору зносостійких матеріалів, геометричної оптимізації (більш сталабільна форма борозни) та впровадження демпфуючих вузлів. Інноваційні рішення (наприклад, тверді покриття Eutalloy/WC, карбідні вставки, «розумні» системи контролю глибини) значно розширюють ресурс. Всі ці ідеї перевіряють лабораторно та практично: випробування підтверджують, що зміцнені сошники служать до 2–3 разів довше, а адаптивне регулювання глибини дозволяє досягти рівномірного посіву на складних полях. Акцентуючи увагу на комбінуванні досягнень науки з технічним обслуговуванням, аграрії можуть значно знизити час простою та витрати на заміну деталей, забезпечивши стабільну якість посіву та високий урожай [3].

РОЗДІЛ 2

ОРГАНІЗАЦІЯ ТА МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальні дослідження виконувалися за заздалегідь сформованою програмою, яка охоплювала послідовну реалізацію комплексу технологічних і випробувальних заходів. На першому етапі було виготовлено дослідні зразки у вигляді виливків із високоміцного та сірого чавуну.

Подальші дослідження були спрямовані на встановлення закономірностей впливу різних режимів термічного зміцнення та поверхневого оплавлення на формування мікроструктури і рівень твердості чавунів. Для цього проводився мікроструктурний аналіз та вимірювання твердості зразків, зміцнених альтернативними технологічними методами.

Наступним етапом програми стали натурні польові порівняльні випробування експериментальних чавунних доліт, зміцнених різними способами, у зіставленні з серійними зразками. Завершальною стадією досліджень було узагальнення та статистична обробка отриманих експериментальних результатів з метою формування обґрунтованих висновків.

Об'єктом дослідження слугували робочі органи долотоподібного сошника сівалки – долота (рис. 2.1), виготовлені з високоміцного чавуну та піддані подальшій термічній обробці.

Предмет дослідження становили закономірності зміни структурного стану, зносостійких властивостей і довговічності литих чавунних доліт сошника залежно від застосування термічних режимів та технологій локального оплавлення, у зіставленні з експлуатаційними характеристиками серійного долота, виготовленого зі сталі 65Г.

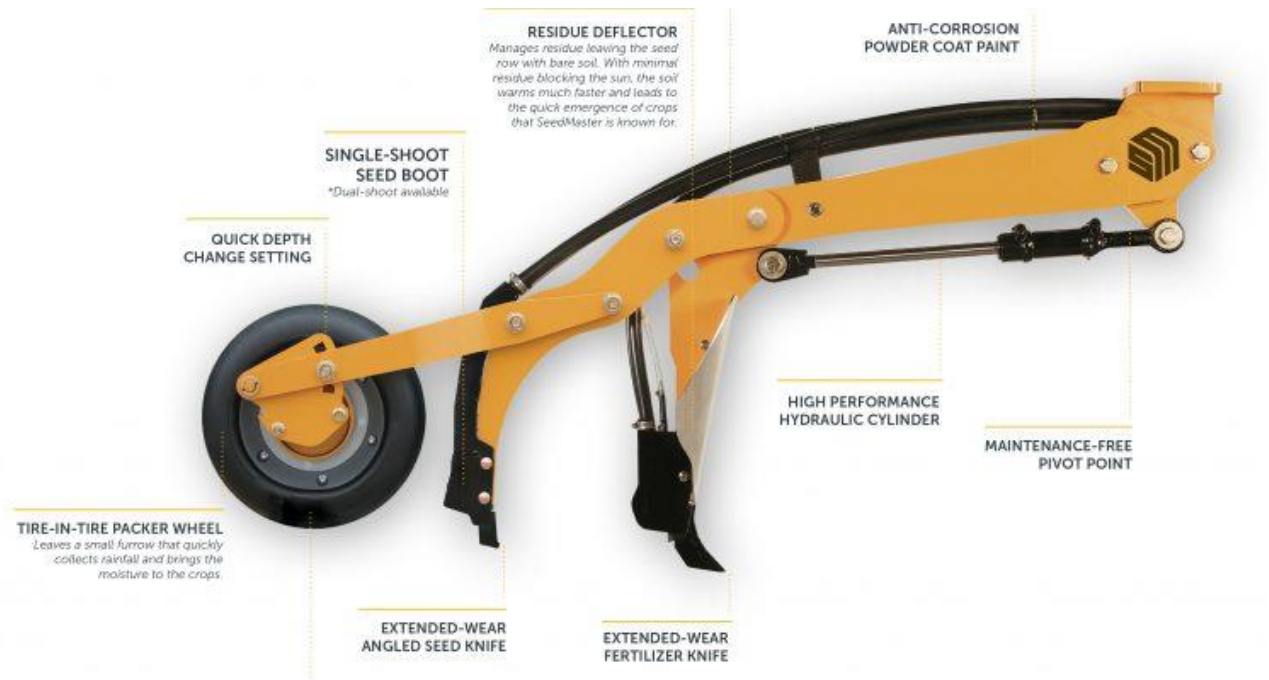


Рис. 2.1 Секція сівалки SeedMaster з долотоподібними сошниками

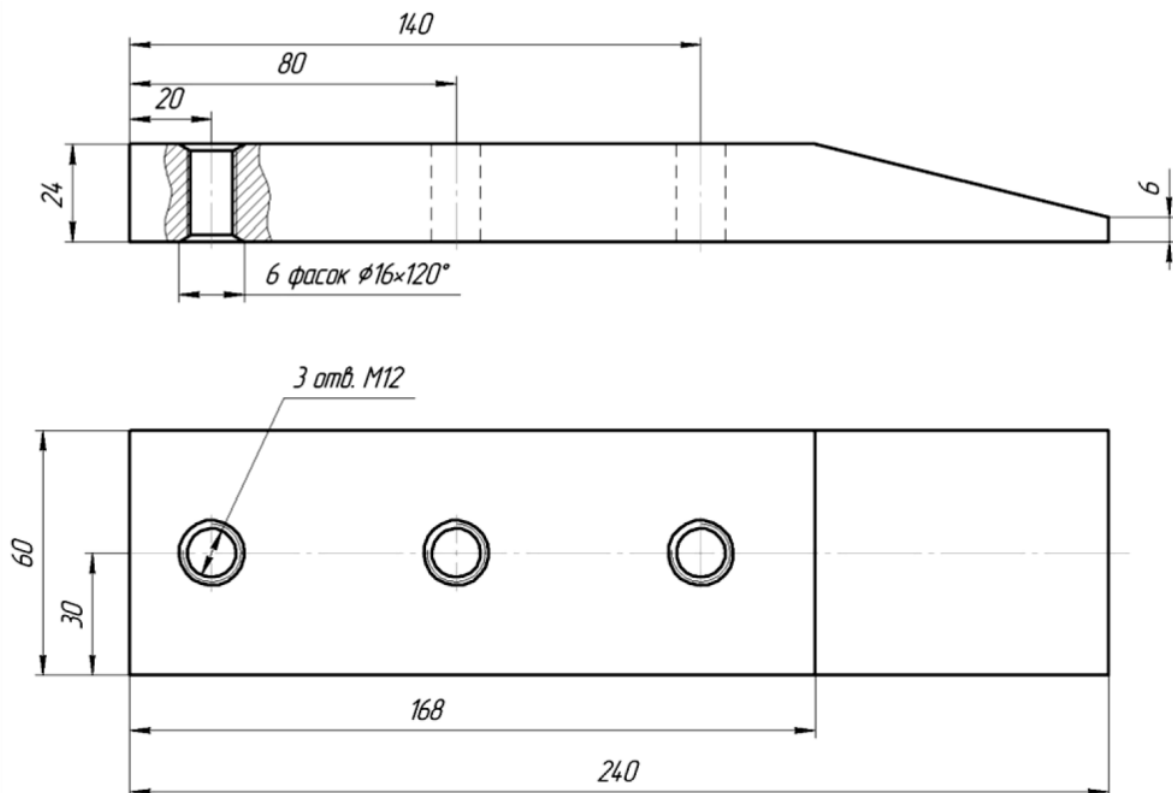


Рис. 2.2. Конструктивна схема долота сошника зернової сівалки SeedMaster

Геометричні розміри та основні техніко-експлуатаційні показники серійного зразка і експериментальних доліт, залучених до випробувань, систематизовано та подано в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Узагальнені технічні характеристики дослідних доліт зернової сівалки

Показники	Параметричні значення, встановлені для експериментальних зразків				
	№1 Серійне долото	№2	№3	№4	№5
Марка	Сталь 65Г	ВЧ-50	ВЧ-50	ВЧ-50	СЧ-20
Спосіб термічного зміцнення	Повне об'ємне гартування з наступним середнім відпуском	Ізотермічне гартування з подальшим низькотемпературним відпуском	Дискретне гартування з подальшим низькотемпературним відпуском	Дискретне гартування з низькотемпературним відпуском і подальшим лазерним зміцненням	Комбінована технологія зміцнення: дискретне загартування, низький відпуск і локальне загартування робочої поверхні СВЧ-нагрівом з оплавленням

Відомості щодо застосованих варіантів термічного впливу на дослідні долота узагальнено та систематизовано в таблиці 2.2.

З метою встановлення раціональних параметрів загартування із застосуванням дискретного режиму охолодження було проведено комплекс експериментальних досліджень, спрямованих на аналіз впливу змінних технологічних факторів на властивості доліт. У ході експериментів здійснювали цілеспрямоване варіювання кількості циклів охолодження, а також тривалості витримки робочої носової частини долота у водному та повітряному середовищах у межах кожного окремого циклу. Такий підхід дозволив оцінити інтенсивність тепловідведення та її вплив на формування структурно-фазового стану матеріалу.

Критеріями оптимізації вибраних режимів слугували характер розподілу твердості по перерізу вилівка, а також особливості мікроструктури в окремих зонах долота, насамперед у приповерхневому та підповерхневому шарах робочої частини. Оцінювання зазначених параметрів дало змогу визначити ефективність

застосування дискретного охолодження з позицій забезпечення однорідності властивостей і підвищення експлуатаційної надійності виробів.

Таблиця 2.2 – Характеристика технологічних режимів термічного зміцнення експериментальних доліт чизельного знаряддя

№ партії	Загартування		Лазерна обробка в атмосфері діоксиду вуглецю			Відпуск
	Нагрів	Охолодження	Потужність, Вт	Швидкість руху променя, мм/хв	Перекриття доріжок, %	
1, серійне	Пічне, $T_z=840^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{виг}}=60\text{хв}$	Масло	-	-	-	$T_{\text{від.}}=360^{\circ}\text{C}$ $\tau=80\text{хв}$
2	Ступінчастий режим нагрівання: підвищення температури до 600°C у печі зі швидкістю 100°C кожні 15 хв, після чого здійснювали нагрів до 900°C у соляній ванні з витримкою 40 хв. Надалі зразки переносили в соляну ванну з температурою 400°C та витримували протягом 2 год.	Оточуюче середовище	-	-	-	$T_{\text{від.}}=250^{\circ}\text{C}$ $\tau=140\text{хв}$
3	Пічне, $T_z=800^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{виг}}=70\text{хв}$	Дискретний режим охолодження: чергування інтервалів охолодження на повітрі та у воді, що включало послідовність 15 с витримки на повітрі, 1 с занурення у воду, 10 с охолодження на повітрі, 6 с у водному середовищі, подальші 15 с на повітрі та завершальне охолодження у воді тривалістю	-	-	-	$T_{\text{від.}}=190^{\circ}\text{C}$ $\tau=80\text{хв}$

		40 с з подальшим доведенням температури до 20 °С за допомогою стисненого повітря.				
4	Пічне, T _з =800°С, τ _{вит} =70хв	Дискретний режим охолодження: послідовне чергування повітряного та водяного охолодження, що включало 15 с витримки на повітрі, 1 с охолодження у воді, 10 с на повітрі, 6 с у водному середовищі, подальші 15 с повітряного охолодження та завершальне водяне охолодження тривалістю 40 с. Остаточне зниження температури до 20 °С здійснювали стисненим повітрям. Після виконання відпуску проводили лазерну термічну обробку (ЛТО).	2100	480	30	T _{від.} =190°С τ =80хв
5	Пічне, T _з =800°С, τ _{вит} =70хв +СВЧ, T _з =940° - 960°С, τ _{вит} =20с с оплавленням поверхні	вода	-	-	-	T _{від.} =180°С τ =90хв

Експериментальні виливки з високоміцного чавуну, термічно оброблені за обраними режимами, а також серійні долота зі сталі 65Г, які використовувалися як еталонні зразки для порівняння, були піддані натурним польовим

випробуванням. Метою таких випробувань було визначення ресурсу роботи доліт у реальних умовах експлуатації та оцінка їх зносостійкості й довговічності.

Визначення твердості сірих і термічно зміцнених доліт здійснювали із застосуванням стаціонарних вимірювальних приладів відповідно до стандартних методик. Зокрема, вимірювання проводили за методом Брінеля з використанням твердоміра НВ-3000В, за методом Роквелла на приладі ІТР-60/150М, а також за методом Віккерса із застосуванням твердоміра КВ-30 S. Такий комплексний підхід забезпечив отримання достовірних і взаємодоповнювальних результатів щодо рівня та градієнта твердості матеріалу.

Дослідження мікроструктури виконували на металографічних шліфах, вирізаних із експериментальних доліт у характерних зонах. Підготовлені шліфи піддавали хімічному травленню 4%-м ніталем (4%-м спиртовим розчином азотної кислоти), після чого аналіз мікроструктури здійснювали при збільшеннях від $\times 100$ до $\times 1000$ з використанням оптичного мікроскопа Neophot-21. Отримані мікроструктурні зображення дозволили оцінити характер фазових перетворень, розмір і форму структурних складових та їх залежність від режимів термічної обробки.

Для виконання експериментальних робіт і проведення досліджень застосовували відповідне лабораторне та вимірювальне обладнання, що забезпечувало відтворюваність режимів обробки та необхідну точність експериментальних вимірювань.

Для проведення експерименту та досліджень використовували:

1. Трактор John Deere 8320.
2. Сівалка SeedMaster.



Рис. 2.3. Сівалка SeedMaster.

Порівняльну оцінку працездатності доліт до досягнення граничного зносу здійснювали під час виконання технологічних операцій, що відповідають їх функціональному призначенню. Випробування проводили в природно-

виробничих умовах, типових для території Житомирської області, з урахуванням особливостей рельєфу, фізико-механічного стану ґрунтів та показників якості обробітку.

Основний обсяг лабораторно-польових досліджень було реалізовано на виробничих площах ТОВ «Райз-Полісся» на ґрунтах із питомим опором у межах 7...12, які характеризуються незначним вмістом органічної речовини (масова частка гумусу менше 2 %) та робочою вологістю 8...10 %. Зазначені умови дозволили відтворити реальні експлуатаційні навантаження, характерні для регіону.

Експериментальні та серійні долота монтували на одну сівалку SeedMaster з дотриманням послідовності встановлення відповідно до номерів партій (табл. 2.2). Така схема розміщення забезпечувала максимальну тотожність умов роботи всіх зразків та виключала вплив сторонніх факторів на результати випробувань.

У ході експлуатаційних випробувань у разі виходу дослідного долота з робочого стану його заміну здійснювали виключно долотом того самого експериментального варіанту, що дозволяло зберегти коректність порівняння. Зразки, які досягли граничного зносу або були відбраковані, вилучали з роботи, зберігали в установленому порядку та передавали на подальшу технічну й структурну експертизу з метою детального аналізу причин втрати працездатності.

На етапі попередньої технічної експертизи здійснювали контроль відповідності експериментальних і серійних доліт вимогам технічних умов з погляду рівня та якості їх виготовлення. Одночасно проводили визначення маси кожного зразка, а також виконували вимірювання основних геометричних параметрів, зокрема розмірів носової частини, загальної довжини долота та поперечних перерізів по ширині відповідно до прийнятої схеми обмірів (рис. 2.4).

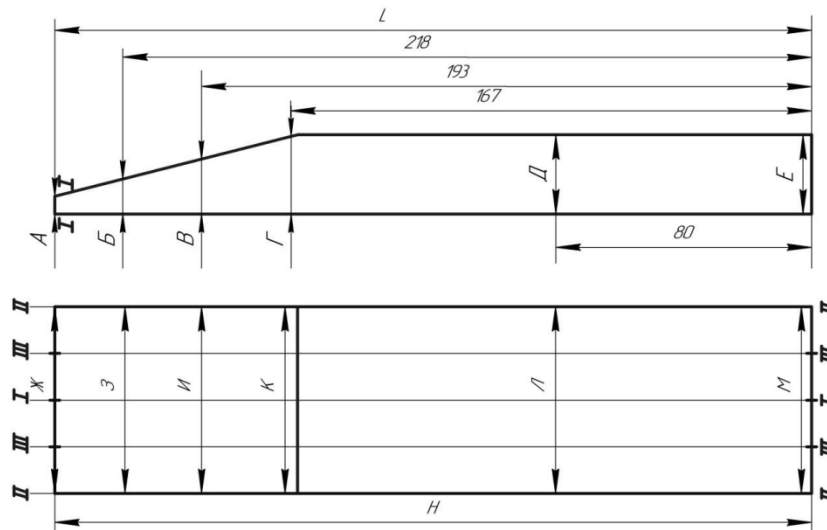


Рис. 2.4. Схематичне зображення контрольних геометричних параметрів долота за характерними перерізами.

Після кожного етапу напрацювання, що відповідав обробітку площі 2,5 га на один корпус, здійснювали комплексний контроль геометричних параметрів доліт. У межах цього контролю проводили вимірювання лінійних розмірів, визначали поточну товщину різальної кромки носової частини, а також фіксували появу потиличної фаски з від'ємним кутом, оцінювали її геометричний стан і динаміку подальшого розвитку. Особливу увагу приділяли аналізу здатності носка долота до самозаточування в процесі експлуатації. Поточний технічний стан доліт відстежували щоденно.

Вибракування експериментальних зразків здійснювали за сукупністю експлуатаційних і технічних критеріїв, до яких належали: перевищення допустимих значень нерівномірності глибини обробітку ґрунту відносно агротехнічних вимог; порушення стабільності заглиблення долота; механічне руйнування долота; а також досягнення граничного рівня зношування робочої частини.

На завершальному етапі випробувань виконували підсумкову технічну експертизу, під час якої для всіх зразків повторно визначали лінійні та масові характеристики і здійснювали комплексну оцінку їх технічного стану за всіма контрольованими показниками.

Висновки до розділу

У другому розділі магістерської роботи сформовано та обґрунтовано методичний підхід до проведення експериментальних досліджень, а також розроблено технологічну схему зміцнення робочих органів. Запропонована методика передбачає поєднання лабораторних і польових випробувань, що забезпечує всебічну оцінку впливу різних режимів термічної та комбінованої обробки на структурно-механічні та експлуатаційні характеристики доліт.

Описаний технологічний процес зміцнення дозволяє варіювати параметри термічної, дискретної та локальної обробки з метою формування оптимальної мікроструктури матеріалу та підвищення зносостійкості робочої поверхні. Розроблена методика контролю геометричних параметрів, твердості та стану робочої кромки створює надійну основу для порівняльного аналізу експериментальних і серійних зразків та подальшого визначення їх ресурсу в умовах реальної експлуатації.

Результати, отримані в межах даного розділу, слугують базою для подальшого аналізу експериментальних даних і формування науково обґрунтованих висновків щодо ефективності запропонованих технологій зміцнення.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Згідно з розробленою методикою досліджень було виконано серію порівняльних лабораторних випробувань, спрямованих на оцінку абразивної зносостійкості чавунів і сталі після термічної обробки за різними технологічними режимами. Дослідження проводили відповідно до чинних нормативних вимог ДСТУ із застосуванням торцевої машини тертя, що забезпечувало відтворюваність умов навантаження та зносу.

Під час випробувань нерухомий зразок притискали до абразивної поверхні із закріпленим карборундовим матеріалом із розміром зерен 100–125 мкм з постійним зусиллям 39,2 Н. Абразивний диск здійснював відносний рух зі швидкістю 1,0 м/с. Тривалість одного випробування для кожного зразка становила 5 хвилин, при цьому контроль масового зносу здійснювали з інтервалом 1 хвилина шляхом зважування.

Кількісну оцінку зносостійкості матеріалів виконували за показником відносної зносостійкості ϵ , який визначали як відношення втрати маси дослідного зразка Δm до втрати маси еталонного зразка $\Delta m_{\text{ет}}$ за ідентичних умов випробування. У якості еталонного матеріалу при проведенні порівняльних випробувань використовували сталь 65Г, зносостійкість якої умовно приймали за одиницю ($\epsilon = 1$).

Зміна маси зразків експериментальних матеріалів у процесі абразивного зношування залежно від довжини шляху тертя наведена на рис. 4.1. Аналіз отриманих результатів засвідчив, що найвищими показниками зносостійкості характеризуються сірий і високоміцний чавуни з відбіленою робочою поверхнею, значення яких істотно перевищують аналогічні показники інших досліджуваних матеріалів.

Зокрема, для високоміцного чавуну ВЧ50 після лазерної термічної обробки з оплавленням поверхні відносна зносостійкість досягала $\epsilon = 4,02$, тоді як для

сірого чавуну СЧ20 після загартування струмами високої частоти значення ϵ становило 3,6. Водночас було встановлено, що для чавуну ВЧ50 з відбіленим поверхневим шаром, сформованим у процесі ЛТО, високий рівень зносостійкості зберігається не протягом усього випробування: після проходження шляху тертя близько 200 м спостерігалось зростання інтенсивності зношування. Це явище пов'язане з обмеженою товщиною відбіленого шару та його поступовим стиранням, унаслідок чого значення ϵ зменшувалося з 4,02 до 2,56.

Сталь Hardox 400 продемонструвала опір абразивному зносу, близький до показників сталі 65Г, із відносною зносостійкістю $\epsilon = 0,91$, що корелює з однаковим рівнем твердості після термічної обробки. Для високоміцного чавуну ВЧ50 у стані ізотермічного та термоциклічного загартування з формуванням бейнітної структури відносна зносостійкість перебувала в межах $\epsilon = 1,88\text{--}2,19$, що суттєво перевищує показники конструкційних сталей, але поступається матеріалам з відбіленим поверхневим шаром.

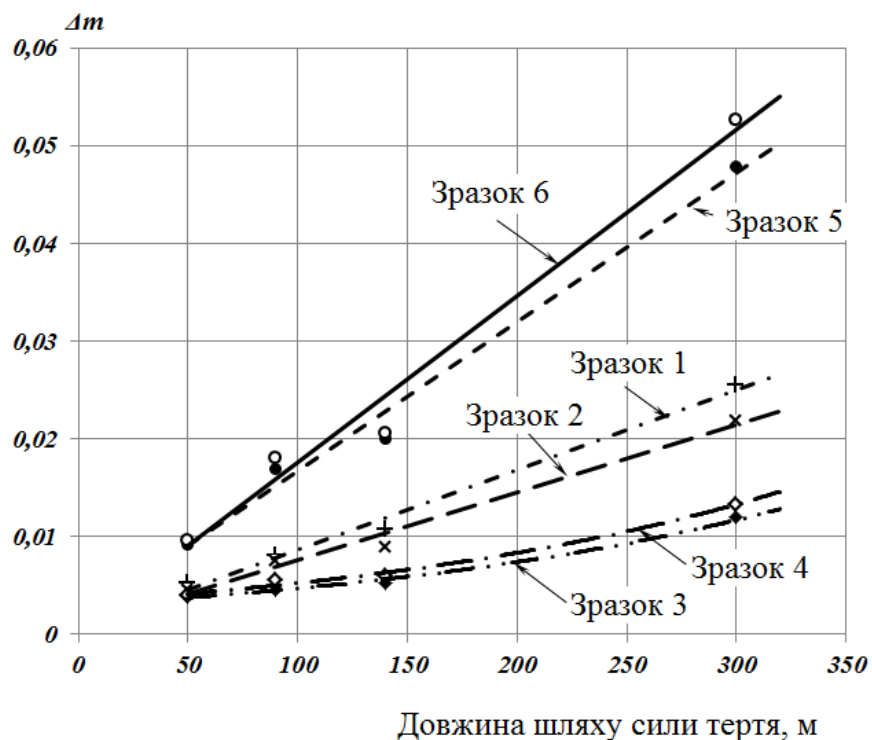


Рис. 4.1. Графічна залежність втрати маси експериментальних зразків від пройденої довжини шляху тертя.

Згідно з програмою польових випробувань упродовж усього експериментального періоду здійснювали систематичний контроль масових показників дослідних зразків. Величину зношування визначали шляхом обчислення різниці між масою зразка, зафіксованою після певного напрацювання, та його початковою масою до початку випробувань. Узагальнені результати проведених вимірювань подано на рисунку 4.2.

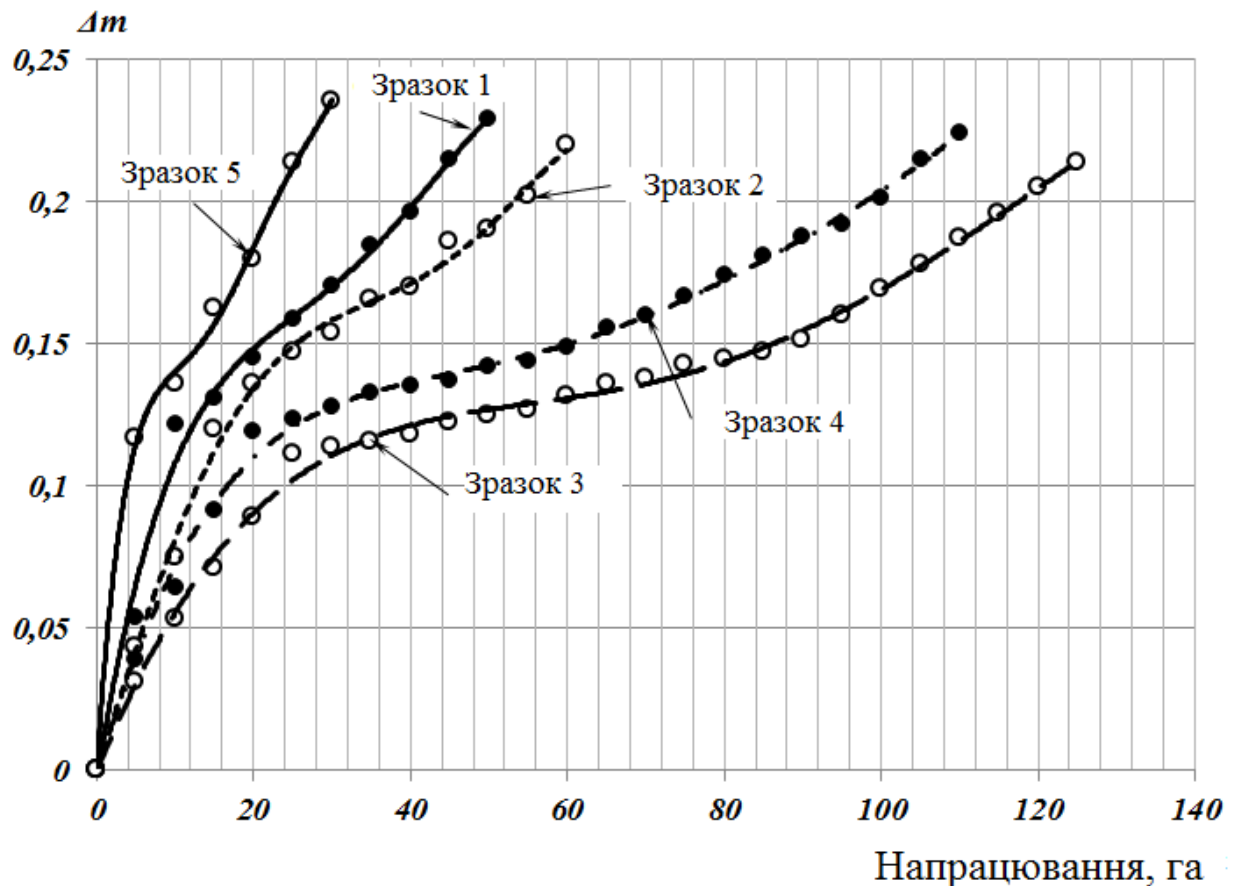


Рис. 4.2. Динаміка втрати маси експериментальних зразків доліт, виражена у відсоткових частках, залежно від напрацювання.

Узагальнення отриманих експериментальних даних свідчить, що найвищими показниками зносостійкості характеризуються долота, виготовлені з високоміцного чавуну ВЧ-50, робоча поверхня яких була піддана лазерному оплавленню. Застосування зазначеного виду термічної обробки забезпечило зростання експлуатаційного ресурсу робочих органів більш ніж у чотири рази порівняно з базовим зразком. При цьому виражений нелінійний характер кривої

зношування після досягнення напрацювання близько 80 га вказує на поступове стирання тонкого відбіленого шару в цьому інтервалі експлуатації.

Зміцнення робочої поверхні струмами високої частоти також продемонструвало високі результати. Максимальне напрацювання доліт, оброблених за цим режимом, досягало 110 га, що приблизно у 3,5 раза перевищує відповідний показник для серійних доліт зі сталі 65Г.

Використання режиму термоциклічного загартування дало змогу підвищити довговічність робочих органів у 2,0–2,2 раза, що є вагомим результатом з огляду на відносну простоту реалізації даного технологічного впливу.

Загалом результати, отримані в ході польових випробувань, добре корелюють із даними лабораторних досліджень. Значення показників відносної зносостійкості матеріалів залишилися на порівнянному рівні, що підтверджує адекватність обраної методики експериментальних досліджень.

Відповідно до схеми, наведеної на рисунку 2.5, для оцінки геометричних змін робочих органів було прийнято два основні контрольні перерізи: переріз А–А, розташований у фронтальній площині вздовж осі симетрії долота, та переріз В–В, що проходить через бічну грань робочого органу. Зміна параметрів зазначених перерізів для різних експериментальних варіантів подана на рисунках 3.3–3.5.

На графіках по осі ординат відкладено відношення поточного лінійного розміру контрольованого перерізу до його номінального значення. Встановлено, що вибраковування всіх дослідних зразків відбувалося за досягнення значення відносного зменшення перерізу $\Delta = 0,20 \dots 0,22$ для перерізу А–А. Після досягнення зазначеного рівня зношування процес інтенсивного стирання починав поширюватися на елементи кріплення робочого органу, що є недопустимим з точки зору експлуатаційної надійності та безпеки роботи знаряддя.

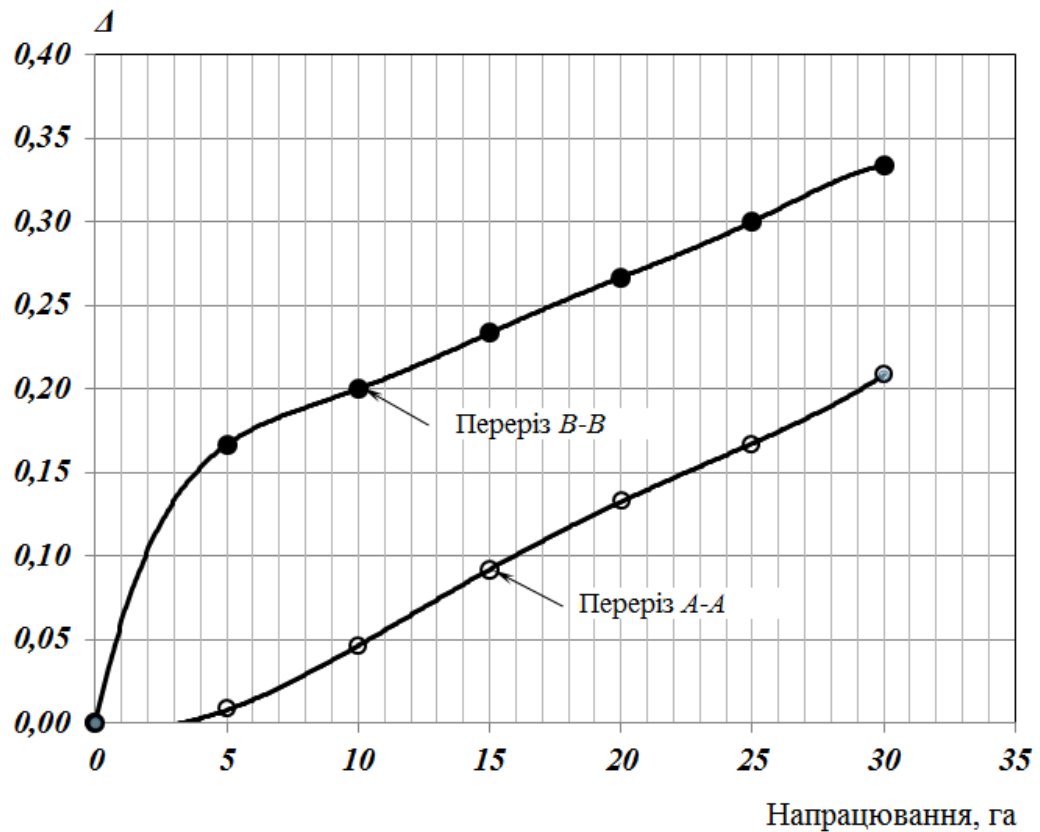


Рис. 3.3. Динаміка геометричних змін контрольних перерізів зразка №5 залежно від величини експлуатаційного напрацювання.

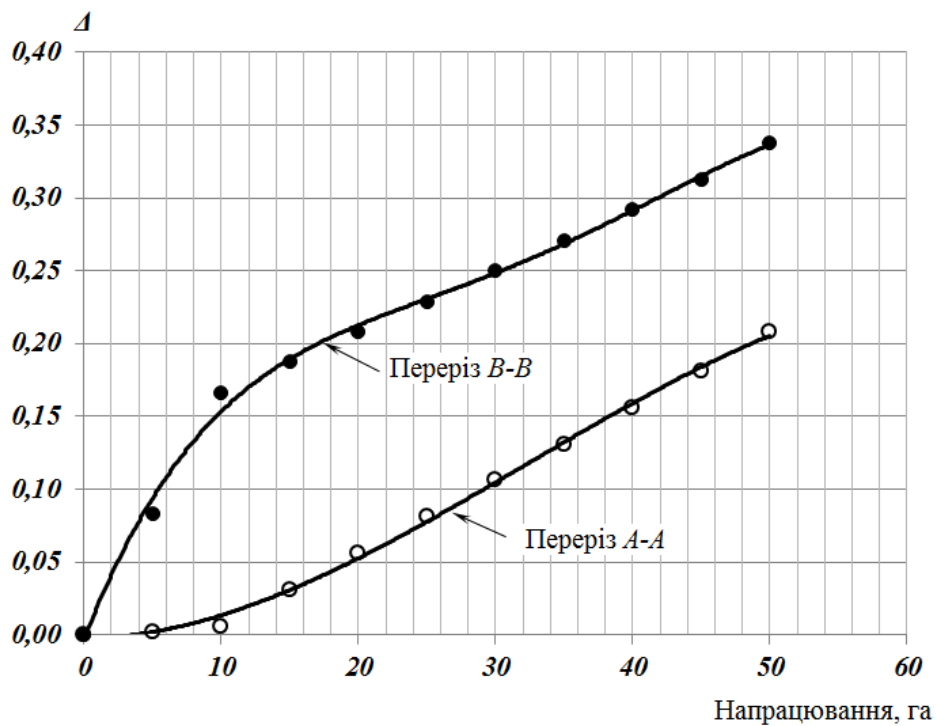


Рис. 3.4. Еволюція лінійних параметрів контрольних перерізів зразка №1 у процесі наростання напрацювання.

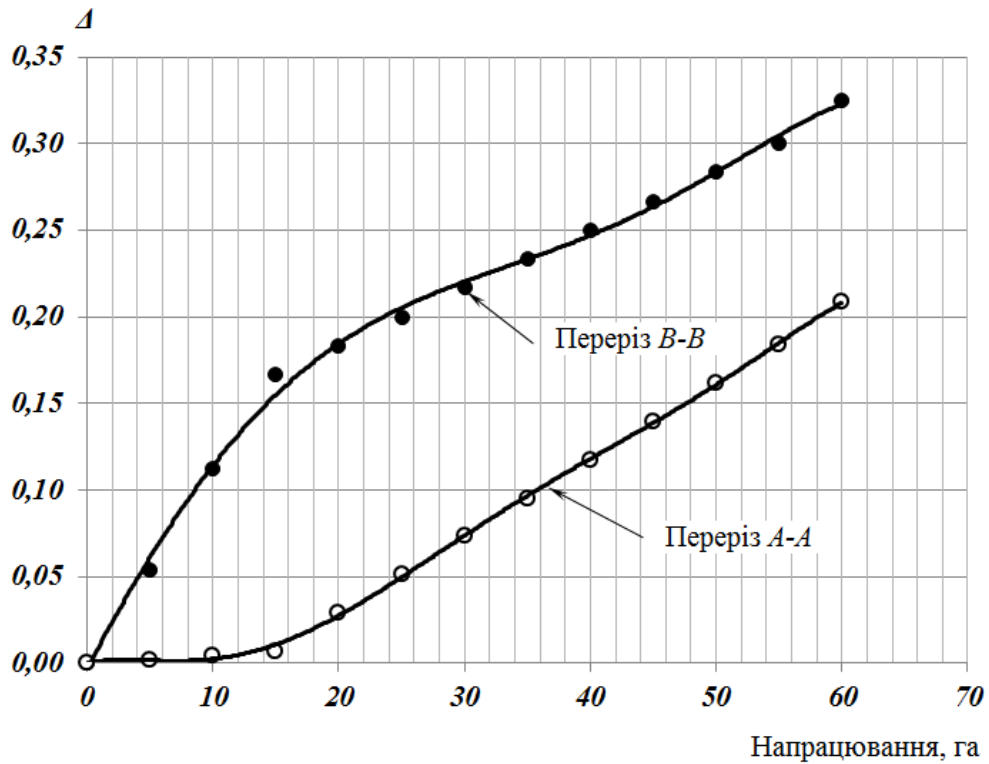


Рис. 3.5. Зміна геометричних параметрів контрольних перерізів зразка №2 у залежності від експлуатаційного напруцювання.

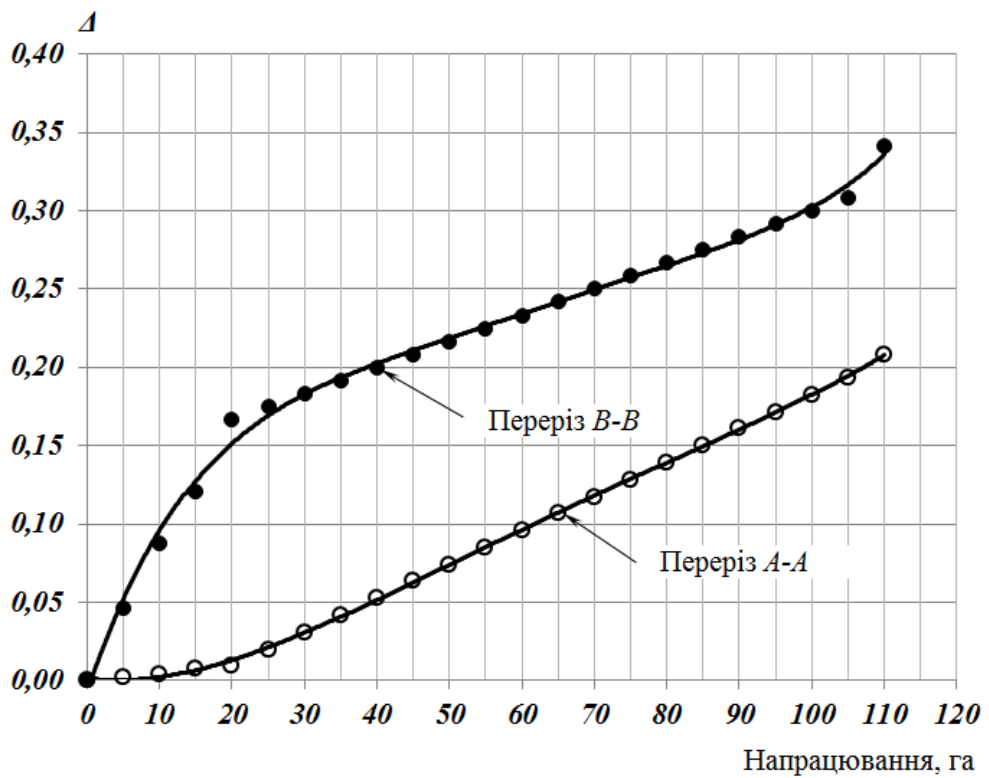


Рис. 3.6. Динаміка змін геометричних параметрів контрольних перерізів зразка №4 у процесі експлуатаційного напруцювання.

Аналіз отриманих експериментальних залежностей дає змогу виокремити два характерні періоди розвитку зносу робочої поверхні доліт. Перший період — стадія припрацювання — відзначається підвищеною інтенсивністю зношування перерізу В–В, у результаті чого формується геометрія робочої частини, що забезпечує стабільне переміщення робочого органу в ґрунтовому середовищі за мінімальних енерговитрат. У межах цієї стадії лінійні параметри перерізу А–А змінюються незначно і залишаються практично сталими.

Другий період — стадія усталеної роботи — суттєво перевищує перший за тривалістю та характеризується синхронною зміною лінійних розмірів обох контрольованих перерізів. При цьому інтенсивність зношування перерізів на даному етапі є близькою за величиною, що свідчить про стабілізацію процесу абразивного зносу та рівномірний характер руйнування матеріалу.

Незважаючи на відмінності у матеріалі виготовлення експериментальних зразків, характер еволюції геометричних параметрів контрольованих перерізів виявився ідентичним для всіх досліджуваних варіантів. Це підтверджується графічними залежностями, побудованими з використанням показника відносного напрацювання. Під відносним напрацюванням у даному дослідженні розуміли відношення поточного напрацювання зразка до його граничного напрацювання на момент вибраковування, що дозволило коректно порівнювати результати для зразків з різною абсолютною довговічністю.

Висновки до розділу

Проведені експериментальні дослідження встановили, що найвищими показниками абразивної зносостійкості характеризуються сірий та високоміцний чавуни з відбіленою робочою поверхнею, причому рівень їх зносостійкості в кілька разів перевищує відповідні показники сталі 65Г. Зокрема, для високоміцного чавуну ВЧ50 після поверхневого оплавлення відносна зносостійкість досягала значення $\varepsilon = 4,02$, тоді як для сірого чавуну СЧ20,

зміцненого загартуванням струмами високої частоти, цей показник становив $\varepsilon = 3,6$.

Разом із тим встановлено, що для чавуну ВЧ50 з відбіленим поверхневим шаром, сформованим у процесі лазерної термічної обробки, високі значення зносостійкості зберігаються не протягом усього циклу випробувань. Починаючи з довжини шляху тертя близько 200 м, спостерігалось зростання інтенсивності зношування, що пов'язано з обмеженою товщиною відбіленого шару та його поступовим стиранням, унаслідок чого значення відносної зносостійкості зменшувалося з $\varepsilon = 4,02$ до $\varepsilon = 2,56$.

Сталь Hardox 400 продемонструвала опір абразивному зносу, співмірний з показниками сталі 65Г, термічно обробленої до близького рівня твердості, з відотною зносостійкістю $\varepsilon = 0,91$ і $\varepsilon = 1$ відповідно. Для високоміцного чавуну ВЧ50 у стані ізотермічного та термоциклічного загартування з формуванням бейнітної структури значення відносної зносостійкості перебували в межах $\varepsilon = 1,88$ – $2,19$.

Порівняння результатів лабораторних і польових випробувань показало їх добру узгодженість, оскільки отримані значення показників відносної зносостійкості практично не зазнали змін при переході від модельних умов до реальної експлуатації.

Незважаючи на різноманітність матеріалів і способів зміцнення експериментальних зразків, характер зміни лінійних розмірів контрольованих перерізів доліт у процесі напрацювання виявився однаковим для всіх варіантів. Це підтверджується графічними залежностями, побудованими з використанням показника відносного напрацювання, що свідчить про універсальність механізму зношування робочих органів незалежно від матеріалу їх виготовлення.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті проведених досліджень встановлено, що в практиці виготовлення доліт стерньових сівалок традиційно використовуються вуглецеві та малолеговані листові сталі. Водночас отримані теоретичні та експериментальні дані переконливо підтверджують доцільність застосування литих робочих органів із сірого та високоміцного чавуну. Використання чавуну як конструкційного матеріалу забезпечує оптимальне поєднання експлуатаційних характеристик, високої технологічності процесу виготовлення та економічної ефективності, що є визначальним для умов серійного і масового виробництва.

Обґрунтовано, що для формування зносостійкого відбіленого шару з оптимальною глибиною та структурою доцільно застосовувати високоміцний чавун із пониженим вмістом марганцю та кремнію, а також зі зниженим значенням кремнієвого еквівалента евтектики. Встановлено раціональний розподіл твердості за функціональними зонами долота: у робочій носовій частині, яка зазнає інтенсивного абразивного зношування, твердість повинна становити не менше 400–450 НВ; у перехідній зоні — 220–260 НВ; у зоні кріплення — не перевищувати 140 НВ. Досягнення зазначених показників забезпечується цілеспрямованим формуванням структурного стану матеріалу: бейнітної або відпущеної мартенситної структури в робочій зоні, феритної або феритно-перлітної — у перехідній та перлітної — у зоні кріплення. Доведено можливість отримання заданого градієнта структур і властивостей у виробках із високоміцного чавуну шляхом реалізації одного циклу об'ємного нагріву заготовок.

Аналіз результатів натурних польових випробувань показав, що найбільший експлуатаційний ресурс мають долота, виготовлені з сірого та високоміцного чавуну з відбіленою робочою поверхнею. Їх довговічність у кілька разів перевищує ресурс серійних зразків зі сталі 65Г. Зокрема, для доліт із

чавуну ВЧ50 після лазерного оплавлення ріжучої кромки приріст ресурсу становив 4,02 рази, тоді як для зразків із чавуну СЧ20, зміцнених загартуванням струмами високої частоти з оплавленням робочої поверхні, ресурс збільшився у 3,6 рази.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Куликівський В.Л., Дармограй М.М., Зінченко Р.О. Конструкція та функціонування запропонованого висівного апарату. 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. 153-156.
2. Бистрицький Б., Кушим Р., Зінченко Р., Куликівський В. Робочі органи сівалок для прямого посіву. Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості: збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Кам'янець-Подільський, 16 жовтня 2025 року). Кам'янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. С. 55-63.
3. Зінченко Р. О., Бистрицький Б. П. Методи та способи підвищення надійності сошників зернових сівалок. Наукові читання – 2025: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Том 2. С. 59-61.
4. Сало В., Гайденко О. Основні типи сошників для прямої сівби зернових культур. Агротехнології сьогодні. URL: <https://surl.lu/jdyeku>.
5. Офіційний сайт Väderstad. URL: <https://www.vaderstad.com/se>.
6. Офіційний сайт AMAZONE. URL: <https://amazone.net/ua>.
7. 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.
8. 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.

9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. Záhon L., et al. Laser Surface Hardening of Austempered Ductile Iron (ADI). Coatings. 2024. Vol. 14(8). Article 958.
15. Górka J., Lont A., Janicki D., Poloczek T., Rzeźnikiewicz A. Comparison of the Erosive Wear Resistance of Ductile Cast Iron Following Laser Surface Melting and Alloying. Coatings. 2024. Vol. 14(5). Article 646.
16. Al-Sayed S.R., et al. A comparative study of laser fluence effect on surface characteristics and wear of austempered ductile iron. Journal of Materials Research and Technology. 2024.
17. Myszka D., et al. Abrasive Wear Resistance of Ultrafine Ausferritic Ductile Iron Austempered at 250 °C. Materials. 2023. (PMC open-access).
18. Titov N.V. Innovative method of tillage tool hardening. [Scientific article / open repository]. 2014.

19. Guesser W.L. Austempered Ductile Iron for Gears. Technical paper / application note (PDF). Тупу.
20. HORSCH. Unsere Produkte im Überblick. Produktbroschüre (PDF) – опис робочих органів, зокрема Meißelschar.
21. Jahrbuch Agrartechnik. Detailverbesserung am Meißelschar / Direktsaattechnik. Jahresband 2012 (PDF).
22. Intelligenter Pflanzenbau. 6. Auflage. (PDF/online) – згадування Zinken- und Meißelschar-Sämaschinen (Primera DMC, Cayena, Condor тощо).
23. Fritzler J., Teegen R. Universal-Drillmaschinen im Vergleich. Vergleichsstudie (PDF).
24. Aalberts Surface Technologies. Austempered Ductile Iron (ADI) – Austempering overview. Web resource.
25. Techniques de l'Ingénieur. Traitements thermiques des fontes : Durcissement superficiel. Ressource technique en ligne.
26. A3TS – Association pour les Traitements Thermiques et les Traitements de Surface. Durcissement après trempe superficielle des aciers et des fontes. Fiche procédé (en ligne).