МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

КУШИМ РОМАН ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 631.3:621.89:620.193

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИН

208 “Агроінженерія”

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

Керівник роботи
Білецький В.Р.
кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Кушим Роман Васильович. Підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

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

У межах кваліфікаційної роботи здійснено комплексне дослідження, спрямоване на підвищення експлуатаційної довговічності та опірності зношуванню робочих органів ґрунтообробної техніки. Основний науковий результат полягає в обґрунтуванні оптимального вибору хімічного складу конструкційних сталей та визначенні ефективних параметрів їх термічної обробки, що забезпечують формування зміцненої структури з підвищеною здатністю протистояти абразивному зношенню в ґрунтових умовах.

У ході роботи сформовано два раціональні технологічні маршрути термообробки для новостворених низьколегованих сталей. Перший включає гарячу прокатку при 1000 °С, подальше гартування за температури 900 °С та наступний відпуск при 280 °С. Другий маршрут передбачає гарячепластичну деформацію при тій самій температурі, гартування при 210 °С з короткочасною витримкою 100 с та завершальний розподільний відпуск при 350 °С тривалістю 1000 с. Обидва варіанти забезпечують оптимальне зміцнення та сприятливий баланс твердості й в’язкості. Також розроблено технологію підсилення робочих органів шляхом установлення у найбільш навантажених зонах спеціальних зносостійких пластин. Ресурс цих елементів перевищує ресурс серійних аналогів приблизно у півтора рази, що істотно знижує частоту їх заміни та витрати на технічне обслуговування.

Експериментальна перевірка в умовах супіщаного ґрунту показала, що робочі органи, виготовлені зі сталі запропонованого складу 0,35C–1,77Si–1,35Mn–0,58Cr–0,20Mo–0,04Nb–0,031Ti, демонструють підвищення зносостійкості на 20 % порівняно зі стандартними зразками. Це підтверджує ефективність як обраного хімічного складу сталі, так і оптимізованих режимів її термічної обробки.

Ключові слова: термічна обробка, надійність, довговічність, зміцнення, робочі органи, ґрунтообробні.

ANNOTATION

Kushym Roman Vasylovych. Improving the Wear Resistance of Soil-Tillage Machine Working Tools. – *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.

As part of the qualification work, a comprehensive study was carried out aimed at increasing the operational durability and wear resistance of the working tools of soil-tillage machinery. The main scientific outcome lies in substantiating the optimal selection of the chemical composition of structural steels and determining effective parameters of their heat treatment, which ensure the formation of a strengthened structure with enhanced resistance to abrasive wear under soil conditions.

Two rational heat-treatment routes were developed for the newly designed low-alloy steels. The first includes hot rolling at 1000 °C, subsequent quenching at 900 °C, and tempering at 280 °C. The second route involves hot deformation at the same temperature, quenching at 210 °C with a short holding time of 100 seconds, and a final partitioning treatment at 350 °C with a holding time of 1000 seconds. Both variants provide optimal strengthening and a favorable balance between hardness and toughness.

A technology for reinforcing soil-tillage working tools was also developed, which consists of installing special wear-resistant plates in zones of maximum load. The service life of these elements exceeds that of standard components by approximately 1.5 times, significantly reducing replacement frequency and maintenance costs.

Experimental testing under sandy-loam soil conditions showed that working tools manufactured from the proposed steel grade 0.35C–1.77Si–1.35Mn–0.58Cr–0.20Mo–0.04Nb–0.031Ti demonstrate a 20% increase in wear resistance compared to standard samples. This confirms the effectiveness of both the selected chemical composition and the optimized heat-treatment regimes.

Keywords: heat treatment, reliability, durability, strengthening, working tools, soil-tillage machinery.

ЗМІСТ

ВСТУП……..……...……5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ……..9
РОЗДІЛ 2. МЕХАНІЧНА ПОВЕДІНКА СТАЛЕЙ ПІСЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ТА МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ……..…59
РОЗДІЛ 3.АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО ВИРОБНИЦТВА ДОВГОВІЧНИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИН……..……72
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ……..……...85
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……...……...……..86

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Обробіток ґрунту є ключовою операцією в технологічному циклі виробництва сільськогосподарської продукції, оскільки саме він визначає фізичний стан і родючість орного шару. У процесі механічного впливу змінюються структура та щільність ґрунту, покращується повітряний режим, активізуються мікробіологічні процеси, забезпечується рівномірне внесення поживних речовин і добрив. Крім того, якісний обробіток сприяє знищенню бур'янної рослинності й шкідників, а також створює умови для акумуляції та збереження вологи.

Робочі органи ґрунтообробної техніки під час експлуатації, а також під час зберігання, зазнають значного зношення під впливом зовнішніх факторів. Інтенсивність цього процесу визначається насамперед характеристиками ґрунту: його мінеральним складом, розміром частинок, наявністю кам'янистих домішок, рівнем вологості та концентрацією агресивних хімічних елементів. Крупнозернисті фракції, тверді включення чи каміння можуть спричиняти ударне та абразивне руйнування деталей, а волога та залишки агрохімікатів провокують електрохімічну корозію, що посилює механічне спрацювання металу.

Сучасні умови експлуатації призводять до того, що конструктивні параметри традиційних робочих органів уже не відповідають зростаючим технологічним вимогам. Щорічне підвищення робочих швидкостей та постійне зростання маси сільськогосподарської техніки збільшують ущільнення ґрунту та призводять до суттєвого зростання навантажень на елементи робочої частини машин. Зокрема, за останні роки навантажуваність на плужні та розпушувальні органи зросла приблизно у чотири рази, однак конструкція самих деталей залишилася майже незмінною [4].

Проблему недостатньої довговічності робочих органів вітчизняні виробники техніки тривалий час вирішували шляхом закупівлі імпортних

комплектуючих. Проте залежність від зовнішніх постачальників значно обмежує технологічну безпеку та підвищує собівартість виготовлення техніки. У зв’язку з цим створення власних технологій зміцнення низьколегованих сталей є стратегічно важливим завданням, адже дає змогу суттєво продовжити строк служби робочих органів ґрунтообробних машин та знизити витрати на їх експлуатацію.

Метою проведених досліджень є забезпечення значного збільшення опору абразивному та корозійному зношуванню робочих органів ґрунтообробної техніки шляхом раціонального добору легувальних елементів у сталях та удосконалення режимів їх термічної обробки.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких наукових **завдань**:

– здійснити комплекс лабораторних та стендових випробувань, спрямованих на визначення фізико-механічних характеристик запропонованих марок сталей;

– сформувати ефективну технологічну схему зміцнення робочих органів шляхом установлення у зонах максимального спрацювання спеціальних високоміцних зносостійких пластин;

– провести натурну оцінку довговічності та рівня зношування робочих органів, виготовлених із розробленої низьколегованої сталі, під час їх експлуатації у супіщаних ґрунтах.

Об’єктом дослідження є процес інтенсивного спрацювання робочих органів ґрунтообробних машин, що виникає під дією зовнішніх кліматичних умов та навантажень, пов’язаних з експлуатацією сільськогосподарської техніки.

Предметом дослідження виступає залежність триботехнічних характеристик сталей від їх легувального складу та параметрів термічної обробки, які визначають рівень опору абразивному й корозійному зношенню.

Методи наукового дослідження. Проведене дослідження ґрунтується на комплексному опрацюванні проблематики, що включає формулювання наукової

мети, визначення дослідницьких завдань, всебічний аналіз теоретичних положень і ґрунтовну обробку отриманих експериментальних даних. Теоретичні напрацювання здійснювалися з опорою на фундаментальні положення фізики та математики, закони трибології, принципи термодинаміки й теорії надійності машин. Експериментальна частина роботи виконувалася із застосуванням сучасних методів випробувань та відповідно до вимог чинних ДСТУ, з використанням високоточних приладів і випробувального обладнання. Достовірність отриманих результатів забезпечено проведенням лабораторних дослідів, стендових тестувань та польових випробувань у реальних експлуатаційних умовах. Аналіз і узагальнення експериментальних даних здійснювалися із використанням методів математичної статистики, що дало змогу об’єктивно оцінити вплив досліджуваних параметрів і підтвердити наукову обґрунтованість висновків.

Перелік **публікацій** за темою роботи:

1. Борак К.В., Куликівський В.Л., **Кушим Р.В.,** Бистрицький Б.П. Особливості абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин. XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (01-17 жовтня 2025 р.). URL: http://animal-conf.inf.ua/conf.html.

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

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

Практичну значущість мають: Оптимізований режим термічної обробки низьколегованих сталей має значну практичну цінність для аграрного сектору, оскільки забезпечує формування структури матеріалу з поєднанням високої міцності та підвищеної ударної в’язкості.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 23 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 88 сторінок комп’ютерного тексту, містить 23 рисунків та 3 таблиці.

РОЗДІЛ 1
СТАН ПРОБЛЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Класифікація й призначення ґрунтообробних машин та їх робочих органів

Обробіток ґрунту є однією з найважливіших технологічних операцій у землеробстві, яка значною мірою впливає на врожайність (близько 25% від загального впливу агротехнічних прийомів) [2]. Ґрунтообробні машини призначені для створення оптимальних умов ґрунту для росту рослин – вони розпушують, аерують ґрунт, знищують бур’яни та заробляють рослинні рештки. У цьому розділі розглянуто *класифікацію ґрунтообробної техніки* за різними ознаками (за видом обробітку, принципом дії, призначенням тощо), *основні групи машин* і їх призначення з прикладами, *історичний розвиток та сучасні тенденції* в ґрунтообробній техніці (як в Україні, так і за кордоном), а також *класифікацію конструктивних типів робочих органів* цих машин та вплив їх конструкції на якість обробітку і зношування. Розділ містить ілюстрації – схеми й фотографії сучасних ґрунтообробних машин та їх робочих органів.

1.1.1. Класифікація ґрунтообробних машин за видом обробітку, принципом дії та призначенням

Ґрунтообробні машини класифікують за кількома основними критеріями, зокрема за агротехнічним призначенням операції, за глибиною та видом обробітку ґрунту, а також за способом дії робочих органів (принципом роботи). Нижче наведено основні підходи до класифікації:

- За призначенням операції: розрізняють машини загального призначення (стандартні операції для підготовки поля) та спеціального призначення (для вузьких агротехнічних задач). До загальних заходів обробітку належать оранка, культивація, боронування, коткування тощо – вони виконуються на кожному полі для підготовки ґрунту до сівби. Спеціальні заходи

спрямовані на розв’язання окремих задач, наприклад протиерозійний обробіток на схилах, глибоке розпушування для меліорації, міжрядний обробіток у посівах та ін.

- За видами обробітку ґрунту (за агротехнічними термінами виконання): виділяють основний обробіток, передпосівний обробіток та міжрядний обробіток. Основний обробіток (основна оранка) проводиться, як правило, один раз за ротацію культури, після збирання врожаю – це найглибший і найважливіший обробіток, що покликаний заробити рослинні рештки й бур’яни у ґрунт та розпушити його на значну глибину. Передпосівний обробіток здійснюється перед сівбою з метою підготовки посівного ложа – включає дрібне розпушення, вирівнювання поверхні, подрібнення грудок тощо. Міжрядний обробіток проводиться у період вегетації культур (в міжряддях просапних культур) для знищення бур’янів та розпушення ґрунтової кірки.
- За глибиною обробітку: розрізняють нульовий обробіток (no-till, повна відмова від механічного впливу), поверхневий (дрібний) обробіток на глибину до ~5–8 см, мілкий – 8–16 см, середній – 16–24 см, глибокий – 24–35 см, а також надглибокий меліоративний обробіток на глибину понад 35–40 см. Види техніки і робочих органів добираються залежно від необхідної глибини: так, поверхневе “лущення” стерні після жнив виконують дисковими лущильниками або легкими культиваторами, середню оранку – плугами загального призначення чи важкими дисковими боронами, глибоке й меліоративне розпушування – чизельними плугами чи глибокорозпушувачами
- За способом дії (принципом роботи): виділяють полицеві (відвальни) знаряддя, безполицеві (безвідвальні), роторні та комбіновані. Полицевий спосіб обробітку передбачає повний оборот пласта ґрунту – класичний приклад *лемішно-відвальний плуг*, який відрізає шар ґрунту і перекидає його відвальною дошкою (полицею). Безполицевий обробіток – це розпушення ґрунту без повного обороту пласта; реалізується *плоскорізами* і *чизельними культиваторами*, які підрізають ґрунт та бур’яни, але не перекидають пласт.

Роторний обробіток виконують *фрезами* або іншими активними (приводними) робочими органами, які обертаються і подрібнюють ґрунт. Комбінований обробіток – це одночасне поєднання кількох способів у одному агрегаті (наприклад, комбінований агрегат може мати дискові і лапові органи, катки тощо), що дозволяє за один прохід виконати кілька операцій.

Отже, сучасна класифікація передбачає врахування різних ознак. В загальному випадку ґрунтообробні машини поділяються на дві основні категорії за призначенням робіт: машини для основного обробітку ґрунту і машини для передпосівного та поверхневого обробітку. До першої категорії належать знаряддя, що виконують глибоке розпушення й оборот пласта (плуги всіх типів, глибокорозпушувачі, важкі дискові борони, чизелі тощо). До другої категорії – машини для дрібнішого обробітку: культиватори для суцільного чи міжрядного розпушення, борони різних типів, котки, а також спеціалізовані комбіновані агрегати для передпосівної підготовки. Окремо можна виділити машини для *нулевого обробітку*, які взагалі не турбують ґрунт перед сівбою (спеціальні сівалки для no-till) – хоча формально їх не відносять до ґрунтообробних машин, вони є елементом сучасних систем обробітку.

За енергетичними та конструктивними ознаками ґрунтообробні машини також поділяють на *причіпні*, *навісні* та *напівнавісні* (за способом агрегатування з трактором), а за способом приводу – на *пасивні* (робочі органи рухаються за рахунок тяги) і *активні* (зі своїм приводом від ВВП трактора або гідромоторів). Більшість класичних знарядь (плуг, борона, культиватор) є пасивними і не мають власного приводу; натомість фрези, ротаційні мотики та деякі комбіновані агрегати мають обертові робочі органи з приводом від двигуна.

1.1.2 Основні групи ґрунтообробних машин та їх призначення (плуги, культиватори, борони, фрези тощо)

Плуги. *Плуг* – це класична машина для основного обробітку ґрунту методом оранки. Під час оранки плуг лемішно-відвального типу відрізає нижнім

ножем (лемешем) шар ґрунту і перевертає його відвальною дошкою, повністю загортаючи на глибину рослинні рештки та бур’яни. Оранка забезпечує глибоке розпушування і аерацію ґрунту, знищення бур’янів шляхом їх перевертання та зароблення, а також часткове вирівнювання поверхні поля. Після збирання врожаю оранка традиційно є першим заходом підготовки ґрунту до наступної культури. Плуги ефективно працюють на більшості типів ґрунтів, хоча на дуже твердих, посушливих чи надмірно вологих ґрунтах застосування класичного плуга ускладнене – там інколи використовують альтернативні знаряддя (дискові чи чизельні плуги).

Рис. 1.1. Плуг загального призначення, агрегатований з трактором, під час виконання оранки.

Лемішно-полицеві плуги здійснюють оборот пласта ґрунту на глибину ~20–30 см, повністю заробляючи стерню і бур’яни під шар ґрунту. Таке інтенсивне розпушення та перевертання створює сприятливі умови для наступної сівби, але вимагає значних енерговитрат і тягового зусилля трактора.

За конструкцією плужного корпуса розрізняють кілька типів плугів: лемішні (відвальні) – найбільш поширені, дискові – зі сферичними дисками замість відвальних корпусів (ефективні на важких, пересушених чи

перезволожених ґрунтах), чизельні – обладнані стійками-ріперами (розпушують без обороту пласта, тому формально є безвідвальними), а також спеціальні ротаційні плуги з активними обертовими органами (фрезовими роторами), що подрібнюють ґрунт імітуючи оранку. Окремо виділяють *плуги комбінованої дії*, які, наприклад, поєднують корпус для обороту пласта з додатковим розпушувачем позаду – для інтенсивного дроблення грудок. За конструктивними особливостями рами й агрегатування існують плуги навісні (до 5–6 корпусів) та причіпні (важкі багатокорпусні, 8–12 корпусів і більше). Також розрізняють оборотні (двосторонні) плуги, оснащені двома симетричними рядами корпусів, які при розвороті агрегату дозволяють продовжувати оранку в протилежному напрямку без утворення гребенів і загонок – це підвищує продуктивність і якість оранки. Сучасні виробники (наприклад, *Kverneland, Lemken*) пропонують широкий модельний ряд оборотних та звичайних плугів з різними конфігураціями корпусів.

Культиватори. *Культиватор* – це машина для поверхневого обробітку ґрунту (на невелику глибину, зазвичай до 5–15 см) та для передпосівної підготовки. Основні функції культивації: розпушування верхнього шару, подрібнення грудочок після оранки, вирівнювання поверхні поля і підрізання бур’янів. Культиватори зазвичай оснащені рядами лап або долотоподібних ножів, які підрізають ґрунт на заданій глибині. На відміну від плуга, культиватор не перевертає пласт повністю, а лише рихлить його і частково перемішує, тому на поверхні можуть залишатися рослинні рештки (що зменшує ерозію та випаровування вологи). Культиватори використовують перед сівбою для підготовки посівного ложа, а також для міжрядного обробітку в посівах просапних культур (міжрядні культиватори обладнані спеціальними лапами та захисними дисками для прополювання бур’яну між рядками рослин).

За конструкцією робочих органів культиватори поділяють на лапові, дискові та глибокорозпушувачі. Лаповий культиватор оснащений плоскорізальними або стрілчастими лапами (широкими трикутними лезами) на

пружинних стійках – вони ефективно підрізають бур’яни по всій ширині захвату і розпушують ґрунт на глибину 5–12 см. Дисковий культиватор має замість лап ряди сферичних дисків малого діаметра; фактично це легка дискова борона, яка добре подрібнює пожнивні рештки і грудки на поверхні. Глибокорозпушувач (чизельний культиватор) обладнаний потужними стояками-ринвами або долотами, що працюють на значній глибині (30–40 см) без обороту пласта – такий культиватор руйнує ущільнені підорні шари, покращує дренаж і аерацію ґрунту. Прикладом є чизельні культиватори типу *Horsch Tiger* чи *Kverneland CLC*, які поєднують декілька рядів лап для глибокого розпушення та, інколи, диски для додаткового подрібнення грудок [6].

Слід зауважити, що культиватори суцільного обробітку можуть комплектуватися й іншими органами: наприклад, пружинними борінками, котками для прикочування, ножами для підрізання бур’янів тощо [12]. Це робить їх універсальними агрегатами для передпосівної підготовки ґрунту за один прохід.

Борони. *Борона* – знаряддя для поверхневого розпушення, вирівнювання та дроблення ґрунту після оранки або культивації. Борони також застосовуються для руйнування ґрунтової кірки та *лущення стерні* – дрібного обробітку поля відразу після жнив, щоб частково заробити пожнивні рештки і стимулювати проростання бур’янів. Класичні борони поділяються на два основних типи за видом робочих органів: зубові (шлейф-борони) та дискові борони [2].

Зубові борони мають просту конструкцію: на рамі закріплено багато міцних сталевих зубів (шипів), які дряпають поверхню ґрунту. Зуби можуть бути різної форми – прямі, *лапчасті* (з розгалуженим кінцем у вигляді маленької лопатки) чи пружинні вигнуті прути. Під час руху зуби борони діють як клини, розпушуючи верхні 3–8 см ґрунту і вибираючи (вичісуючи) проростлі ниткоподібні бур’яни/ Зубові борони бувають *легкі, середні, важкі* – залежно від маси і тиску на один зуб. Ними зазвичай проводять ранньовесняне боронування озимих, боронування зябу, а також завершальне вирівнювання перед сівбою.

Дискові борони (часто їх називають *дискаторами*, *лущильниками дисковими*) оснащені увігнутими сталевими дисками діаметром 40–70 см, закріпленими на осях-батареях під кутом до напряму руху. Обертаючись при русі агрегату, диски врізаються в ґрунт, *перерізають рослинні рештки та частково перевертають і кришать верхній шар*. Дискова борона здатна працювати на глибину ~5–15 см (залежно від діаметра дисків і кута атаки) і особливо ефективна для лущення стерні та подрібнення пожнивних залишків кукурудзи, соняшника тощо [4]. Заміна плуга на дискову борону в певних умовах дає переваги – економію пального та збереження вологи в ґрунті завдяки меншому обороту пласт [5]. Дискові агрегати бувають різної маси: *легкі* (малі диски, глибина до 8 см), *середні* та *важкі* (значна маса на один диск, глибина 12–15 см), а також *спеціальні болотні* для перезволожених ґрунтів [5]. За формою робочих органів є диски суцільнокрайкові або вирізні (зубчасті) – останні краще подрібнюють тверді грудки і залишки, тому використовуються на важких ґрунтах [6].

Рис. 1.2. Дискова борона (лущильник) навісного типу із секціями увігнутих дисків.

Диски можуть бути гладкими або зубчастими, встановлюються під кутом (кут атаки) для кращого входження в ґрунт [4]. Дискові борони широко

застосовуються для поверхневого обробітку стерні та передпосівної підготовки в технологіях мінімального обробітку ґрунту (Mini-till, No-till) [7].

Окрім класичних зубових і дискових борін, існують ротаційні борони – це легкі агрегати з обертовими зірчастими колесами або прутковими роторами, які швидко обертаючись, розбивають ґрунтову кірку і розпушують верхні 3–5 см ґрунту. Ротаційні борони використовують переважно для догляду за посівами (наприклад, *ротаційна мотика* для прополювання бур'янів на ранніх стадіях, яка має багато дрібних зірочок-зубців). В класифікації їх іноді відносять до культиваторів або до спеціальних борін. Такі знаряддя особливо ефективні на пересохлих кіркових ґрунтах, де пасивні зуби гірше заглиблюються [2].

Спеціальні ґрунтообробні агрегати. Сучасне сільське господарство широко застосовує комбіновані агрегати та посівні комплекси, які поєднують функції обробітку ґрунту і, часто, сівби за один прохід. Наприклад, *компактори* – агрегати для передпосівної підготовки, що містять кілька рядів різних робочих органів: передні диски для подрібнення, середні культиваторні лапи для розпушення, задні пружинні борінки і котки для вирівнювання й ущільнення [7]. Такі машини (напр. *Horsch Joker, Väderstad Carrier*) дозволяють за один прохід створити ідеально підготований ґрунт під посіва [7]. Посівні агрегати типу *John Deere 750A, Väderstad Rapid* одночасно обробляють верхній шар, висівають насіння і прикочують ґрунт, реалізуючи технологію економії часу та палива. Хоча посівні комплекси формально належать до сівалок, їх слід згадати як частину тенденції до агрегатування операцій.

Окремо варто відзначити котки – знаряддя для ущільнення ґрунту. Вони використовуються після посіву або після розпушування для легкого прикочування поверхні з метою збереження ґрунтової вологи та покращення контакту насіння з ґрунтом [7]. Котки можуть мати різні робочі поверхні: гладкі, кільчасто-зубчасті, решітчасті тощо. Хоча коткування – це окремий агрозахід, котки часто комбінуються з іншими знаряддями (наприклад, коток може чіплятися ззаду культиватора).

Лущильники. Поняття *лущильник* в українській агротехнічній термінології зазвичай означає знаряддя для поверхневого обробітку стерні одразу після збирання культури. Метою лущення є підрізання післяжнивних решток та бур'янів на невеликій глибині (5–10 см) з тим, щоб прискорити їх перегнивання та спровокувати проростання падалиці і бур'янів для подальшого знищення. Лущильники можуть бути виконані у вигляді *дискових знарядь* (дискові лущильники – фактично легкі дискові борони) або *лемішних лущильників* (малих плугів з короткими відвалами). В сучасних умовах роль лущильників переважно виконують різноманітні короткі дискові борони. Наприклад, серія вітчизняних агрегатів «ДУКАТ» від компанії *Лозівські Машини* представлена короткими дисковими лущильниками шириною від 2,5 до 16 м для ефективної стерньової обробки [7]. Такі агрегати забезпечують інтенсивне подрібнення рослинних решток і змішування їх з ґрунтом на глибині ~5 см, що сприяє накопиченню вологи та швидкому розкладу пожнивних решток.

1.1.3 Історичний розвиток ґрунтообробних машин та сучасні тенденції

Історичний нарис. Розвиток знарядь для обробітку ґрунту налічує тисячі років. Першими знаряддями були примітивні мотики та палки для копання, якими людина розпушувала верхній шар вручну . В міру переходу до орного землеробства з'явився прототип плуга – так зване рало (борозна палиця), що являло собою роздвоєний загострений сук, яким волочили землю, залишаючи борозни [9]. Уже у стародавніх шумерів та єгиптян застосовували дерев'яні плуги, які тягнули люди або впрягали волів [7]. Важливим кроком стало використання тяглової сили тварин: спочатку плуг прив'язували до рогів, а пізніше було винайдено ярмо, що значно підвищило продуктивність оранки [1].

З розвитком металургії критичним удосконаленням стало оснащення плуга залізним лемешем і чересломом. Відкриття *відвальної дошки* (полиці) в давньоримських плугах спричинило агротехнічну революцію – вперше ґрунт почав перевертатися, повністю загортаючи дернину та бур'яни під шар землі . Римський плуг з залізним ножем, колесом для регулювання глибини та відвалом

став прообразом класичного плуга, що проіснував майже незмінно до кінця Середньовіччя. Надалі, у XVIII–XIX століттях, в Європі відбувся перехід від повністю дерев'яних плугів (лише з залізним наконечником) до суцільнометалевих плугів. Винаходи Джетро Тулла (британський плуг із змінними відвалами) та вдосконалення конструкції в різних країнах призвели до появи міцних залізних плугів. Знаковою подією стало виготовлення в США у 1837 році Джоном Діром сталевого плуга з відполірованої сталі, який не налипав на вологому ґрунті – цей плуг значно полегшив оранку важких прерійних ґрунтів і започаткував промислове виробництво плугів на Американському континенті.

Поява парових тракторів у другій половині XIX ст., а згодом і бензинових тракторів на початку XX ст., призвела до механізації обробітку ґрунту. Важкі плуги почали агрегатувати з тракторами, збільшувалася кількість корпусів (плуг 3-, 5-, 7-корпусний тощо) для охоплення більшої смуги за один прохід. Розширювався і арсенал інших знарядь: з'явилися дискові борони (їх прообраз – *дискова борона Мерріса*, запатентована у США 1883 р.), культиватори (спершу кінні, потім тракторні знаряддя для розпушування без обороту пласта) та котки різних конструкцій.

У радянський період (XX ст.) в Україні та СРСР загалом активно розвивалося сільгоспмашинобудування: були стандартизовані серії плугів (ПЛН – плуг навісний, тощо), культиваторів (КПШ – культиватор паровий широкозахватний, КРН – культиватор міжрядний), борін (БЗТС – борона зубова, БДТ – борона дискова тяжка тощо). Винахідниками пропонувалися нові ідеї: так, відомий хлібороб Терентій Мальцев у 1950-х запровадив *безвідвальний плоскорізний обробіток* – для чого було сконструйовано плоскорізи (ПЛ – плоскоріз Листєва, ФОП – плоскоріз-орудие Фокіна та ін.), що дали початок чизельним і лаповим глибокорозпушувачам. Проте класична оранка залишалась домінуючим методом обробітку до кінця XX ст.

Сучасні тенденції. Сьогодні розвиток ґрунтообробних машин і технологій іде в напрямі підвищення ефективності, продуктивності та екологічної обґрунтованості обробітку. Основні сучасні тенденції такі:

- Мінімальний та нульовий обробіток (No-till, Mini-till). Все ширшого застосування набувають технології, що зменшують інтенсивність рихлення ґрунту заради збереження його структури та вологи. В південних посушливих регіонах України, наприклад, поширені мінімальні технології, де основний обробіток замінюють дискуванням на невелику глибину. Дискові агрегати в таких системах часто повністю *замінили плуг*, що дало економію пального та краще збереження вологи. *Нульовий обробіток* взагалі відмовляється від традиційної оранки – висів здійснюється спеціальними сівалками прямо в необроблений ґрунт. Ці технології диктують попит на відповідну техніку: важкі дискатори, чизельні плуги глибокого розпушення замість обороту, комбіновані агрегати, що за один прохід виконують і лущення, і передпосівний обробіток, і коткування. Світові виробники (наприклад, *John Deere*) пропонують цілі лінійки глибокорозпушувачів, чизельних плугів, агрегатів вертикального обробітку ґрунту для консервуючого землеробства.
- Комбінування операцій і універсалізація. Сучасні агрегати часто поєднують декілька робочих вузлів: диски + лапи + коток (компактори, комбіновані культиватори), плуг + ущільнювальний каток, посівний комплекс з дисковою бороною тощо. Це дозволяє скоротити кількість проходів техніки полем, зекономити пальне та час, а також зменшити ущільнення ґрунту колесами. Приклад – комбіновані агрегати *Horsch Tiger, Lemken Korund*, які одним знаряддям виконують функції і плуга, і культиватора, і борони.
- Нові матеріали та конструкції робочих органів. Підвищена увага приділяється зменшенню тягового опору і зношування. Розробляються *полегшені відвали плуга* – смугові (решітчасті) полиці, які мають прорізи. Вони зменшують тертя ґрунту об поверхню, завдяки чому знижується опір тязі і поліпшується кришення пласту. Для підвищення зносостійкості лемешів і лап

застосовують наплавлення твердим сплавом, використання змінних доліт, матеріали з борвмісної сталі тощо. В результаті збільшується ресурс деталей, а отже, стабільніше забезпечується якість обробітку на заданому рівні.

- Прецизійне (точне) землеробство та автоматизація. Сучасні трактори і агрегати оснащуються GPS-навігацією, системами автоматичного водіння, контролю глибини і кута атаки робочих органів. Це забезпечує більш рівномірний обробіток без пропусків і перекриттів, дотримання оптимальної глибини по всьому полю, що особливо важливо для точного землеробства. Деякі нові моделі плугів, наприклад від *Lemken* чи *KUHN*, оснащені гідравлічними системами вирівнювання глибини, регулювання ширини захвату корпусів "на ходу" та автоматичного вирівнювання агрегату на схилі. Такі «інтелектуальні» функції покращують як продуктивність, так і якість виконання технологічної операції.

- Розвиток вітчизняного машинобудування. В Україні останніми роками з'явилися сильні виробники ґрунтообробної техніки, що конкурують зі світовими брендами. Приміром, компанія *«Лозівські Машини»* (Lozova Machinery) створила лінійку коротких дискових борін «ДУКАТ», які за технічними характеристиками відповідають кращим світовим аналогам. Конструктивною «родзинкою» цих агрегатів є ресорна стійка диска, яка гасить удари, захищає диск від пошкоджень і зменшує тяговий опір, що дозволяє агрегатувати широкозахватні борони навіть з тракторами середнього класу. У сімействі «ДУКАТ» реалізовано також системи копіювання рельєфу та низку інших опцій для покращення якості роботи в різних умовах. Інший приклад – завод *"Elvorti"* (колишня "Червона Зірка"), який історично відомий сівалками, нині виробляє сучасні культиватори суцільного і міжрядного обробітку, борони та комбіновані комплекси. Певний вклад у розвиток техніки роблять і підприємства, пов'язані з тракторобудуванням – наприклад, *ХТЗ* (Харківський тракторний завод) у співпраці з іншими заводами випускав ґрунтообробні

знаряддя для своїх тракторів, а нині орієнтується на імпортні агрегати, адаптуючи їх до вітчизняних умов.

Разом з тим, слід відзначити, що українські аграрії все ще значною мірою покладаються на імпортну техніку. За оцінками профільних видань, в господарствах України на 2013 рік було близько 125 тис. різних ґрунтообробних агрегатів, тоді як потреба оцінювалась у понад 210 тис. Державні програми стимулювання оновлення техпарку (на кшталт програми «Зерно України – 2015») декларували збільшення частки вітчизняних машина, і наразі українські виробники нарощують випуск. Проте для закриття дефіциту багато господарств закуповують техніку таких світових брендів, як *John Deere, Case IH, New Holland (CNH), KUHN, Lemken, Horsch, Amazone* та інші, що пропонують високопродуктивні плуги, дискові та лапові агрегати, оснащені найсучаснішими системами.

1.1.4 Основні типи робочих органів ґрунтообробних машин: класифікація та конструктивні особливості

Робочі органи – це частини ґрунтообробної машини, які безпосередньо взаємодіють з ґрунтом (ріжуть, піднімають, перевертають, кришать його). За конструкцією і принципом дії розрізняють кілька *основних типів робочих органів*: лемішні (відвальні), дискові, лапові, ротаційні та зубчасті. Кожен із них має свої особливості роботи, сферу застосування, переваги та недоліки.

- Лемішно-полицеві органи (плужні корпуси). Складаються з горизонтального ножа – лемеша – і криволінійної поверхні – відвала (полиці), закріплених на стійці. Такий орган спочатку підрізає шар ґрунту знизу лемешем, потім піднятий пласт ковзає по полиці, кришиться і перевертається убік, укладаючись догори дном у суміжну борозну. Лемішні корпуси є головним робочим органом класичних плугів. Їх конструкція впливає на якість оранки: існують відвали *циліндричної форми* (добре перевертають пласт, але гірше кришать), *гвинтові (спіралеподібні)* – забезпечують поступовий переворот і кращу кришку грудок, *напівгвинтові* – універсальні. Для зменшення тертя великі

відвали іноді роблять *смуговими* (решітчатими), що також сприяє зменшенню налипання. До допоміжних лемішних органів належать *ножі-чересла* (вертикальні ножі спереду корпусу для підрізання стінки борозни) та *предплужники* – малі додаткові корпуси, що зрізають верхній шар дернини перед основним відвалом, покращуючи повне загортання рослинних решток.

Лемішні робочі органи забезпечують найповніший оборот пласта і очищення поля від рослинності, однак при цьому залишають поверхню грубо-гребнистою, потребують великих тягових зусиль і піддаються значному зношуванню. Найбільш зношуваною частиною є леміш – його край працює як ніж і стикається з ґрунтом під високим тиском. Тому лемеші виготовляють зі спеціальних бористих сталей, часто оснащують змінними долотами на носку (що беруть на себе знос) або наплавляють твердим сплавом. Затуплення чи *підвищений знос лемеша різко погіршує якість оранки*, призводить до недорізання пласта та збільшення витрати пального. Отже, контроль стану і вчасна заміна лемешів є важливою умовою ефективної роботи плуга.

- Дискові робочі органи. Являють собою опуклі диски (плоскі або сферичної форми) діаметром від 300 мм (в культиваторах) до 800 мм (в плугах-дисках), виготовлені зі спеціальної загартованої сталі. Ріжуча кромка диска зазвичай гостра; диски можуть бути *суцільними* або *вирізними (з зубцями по краю)*. Під час руху машини диск обертається і одночасно врізається в ґрунт під кутом, *відрізаючи смугу ґрунту* і частково піднімаючи її. Через сферичність і нахил диск певною мірою перевертає пласт (менш повно, ніж відвал), перемішує його і кришить.

Дискові органи використовуються в дискових боронах, лущильниках, дискових плугах, а також як допоміжні – у комбінованих культиваторах (для різання грудок) тощо. *Ефективність роботи диска залежить від його форми, розмірів, заточення та налаштування кута атаки*. Великий діаметр дозволяє працювати на більшій глибині, але вимагає потужнішої тяги; зубчасті диски агресивніше фрагментують тверді грудки і пожнивні стебла, проте дещо

підвищують тяговий опір. Вага, що припадає на один диск, визначає здатність заглиблення: в важких боронах маса на диск може сягати 100 кг і більше. Щоб дискова батарея не відводила агрегат убік, диски зазвичай встановлюють Х-подібно – два ряди під зустрічними кутами, компенсуючи бічні силит.

Переваги дискових органів – висока прохідність (краще ріжуть пожнивні рештки, менше забиваються), відносно просте обслуговування (нема гострих кутів, які б ламалися), універсальність щодо умов (працюють і на твердому сухому, і на вологому ґрунті). Недоліки – дещо гірше, ніж плуги, загортають рештки (частина стерні лишається змішаною у верхньому шарі) і створюють значне ущільнення під рівнем ходу (так звану *“дискову підошву”* на глибині роботи, якщо багаторазово дискувати на одну глибину). Тому при систематичному використанні тільки дискових знарядь рекомендується періодично виконувати глибоке розпушення чизелем.

Знос дискових робочих органів проявляється у сточуванні їхнього діаметра і затупленні ріжучої крайки. Сферичні диски поступово стають меншого діаметра, що зменшує глибину їх ефективної роботи. Для продовження ресурсу їх виготовляють з високоміцних сталей, час від часу диски можна перевертати (якщо кріплення дозволяє) або підточувати край. У якісних сучасних боронах (зокрема іноземного виробництва) диск служить 300–500 га на одну сторону, після чого його змінюють або переставляють.

- Лапові (плоскорізальні і стрілчасті) робочі органи. Під назвою *«лапа»* об’єднують різноманітні широкі ножі, що підрізають шар ґрунту знизу на невеликій глибині. Класична лапа має вигляд розгорнутого в горизонтальній площині леза, схожого на трикутник або ластівчин хвіст (*стрілчаста лапа*). Лапа кріпиться до стійки культиватора під певним кутом атаки. Під час руху лапа входить горизонтально в ґрунт і відрізає його шар знизу (подібно до плоского ножа), одночасно перерізаючи коріння бур’янів. Бічні крила лапи можуть мати невеликий підйом-вигин (щоб частково підривати ґрунт) або бути плоскими для чистого зрізання.

Лапові органи масово застосовуються в культиваторах суцільної дії (широкі стрілчасті лапи ~25–50 см шириною, що перекривають всю поверхню поля) – для *прополювання бур'янів та розпушення* на глибину 5–12 см. У міжрядних культиваторах використовуються вузькі однобічні лапи-бритви, які ріжуть ґрунт тільки з одного боку рядка (аби підрізати бур'яни впритул до культурних рослин). Також лапи застосовують у комбінованих агрегатах для передпосівного обробітку – там вони розпушують ґрунт після дисків, аби не залишилося невскопаних ділянок.

Конструктивні різновиди лап: плоскорізальні ножі (прямі планки-бритви, що ріжуть під поверхнею), стрілчасті широкі лапи (кут розхилу крил ~70–80°, ефективно обрубують корені бур'янів по всій ширині), долотоподібні лапи (вузькі, для глибшого рихлення, часто з виступом-«кілем» вниз), наральникові лапи (нагадують мініатюрний леміш, можуть трохи піднімати ґрунт). Для підгортання ґрунту в міжряддях використовують *підгортачі* – теж різновид лапових органів з відгортальними крильцями, але їхнє завдання протилежне – не зрізати, а навпаки нагребти ґрунт до рядка (утворити гребінь).

Перевага лапових органів – *невеликий опір і простота конструкції*. Вони не перевертають пласт, зберігають стерню на поверхні (що зменшує випаровування), і водночас ефективно знищують бур'яни підрізанням коренів. Важливою характеристикою є кут загострення леза лапи (зазвичай ~30–45°) та стан заточки. Добре заточена лапа легко ріже коріння; затуплена – починає "гребти" ґрунт, погіршується якість і збільшується витрата пального. Тому лапи потребують періодичного підточування або наплавлення твердими матеріалами. Знос лап проявляється в сточуванні ширини крила та товщини леза. Стрілчасті лапи поступово втрачають свою ширину – щоб уникнути непокритих смуг, їх слід замінювати при зменшенні ширини більш ніж на 20% від номіналу.

- Ротаційні робочі органи. Це активні органи, що обертаються від приводу трактора або за рахунок контакту з ґрунтом, виконуючи інтенсивне дроблення та змішування ґрунту. Прикладами є: фрезові ножі на роторі

ґрунтофрези, роторні культиватори з вертикальними роторами (типу *Rotary tiller*), ротаційні мотики з зірчастими колесами тощо. Найпоширеніший ротаційний орган – це *ножова фреза*: на горизонтальному валу розташовані Г-подібні або серпоподібні ножі, які при швидкому обертанні врізаються в ґрунт і кришать його на дрібні фракції, повністю перемішуючи верхній шар. Фрези здатні створити дуже пухкий дрібногрудочкуватий ґрунт, придатний для висіву дрібного насіння (овочеві, розсадники), або для заробки добрив, гною тощо.

Рис. 3. Навісна ротаційна ґрунтофреза (рототилер) в агрегаті з трактором. Обертовий ротор з вигнутими ножами інтенсивно подрібнює та перемішує ґрунт на глибину ~10–15 см, залишаючи рівномірну дрібногрудочкувату структуру. Ротаційні фрези виконують повний обробіток за один прохід, замінюючи оранку і культивацію, але потребують значної потужності трактора і спричиняють швидке зношення ножів.

Ротаційні органи забезпечують високий ступінь кришення ґрунту, що актуально, наприклад, для підготовки гряд під овочі, саджанці або в тепличному господарстві. Також їх застосовують при освоєнні цілини, переробці дернини – фреза може подрібнити шар дерну, який плуг лише перевернув би пластами. Проте недоліком надмірної інтенсивності є можливе *“перебивання” структури ґрунту*: якщо фрезувати регулярно, ґрунт може втрачати структуру, порошитися, що призводить до ущільнення від опадів, утворення кірки, погіршення аерації коренів. Тому фрези доцільно застосовувати вибірково, коли потрібне саме повне перемішування.

Знос роторних ножів дуже значний, особливо на кам’янистих ґрунтах – ножі швидко тупляться і навіть можуть ламатися при ударах об каміння. Їх виготовляють з високовуглецевої або марганцевої сталі, кріплять болтами до фланця ротора для зручності заміни. Як правило, комплект ножів служить 100–200 гектарів, після чого потрібна їх заміна. Заміна ножів – регулярна стаття експлуатаційних витрат при роботі ґрунтофрез.

- Зубчасті робочі органи (шипи, зуби, стояки-ринви). Під цією умовною категорією маються на увазі органи у вигляді окремих зубців або стояків, які точково впливають на ґрунт. Сюди можна віднести зуби *зубових борін* (розглянуті вище), *пружинні зубці культиваторів* (наприклад, у пружинних борінок і легких культиваторів для суцільного обробітку), а також стояки чизельних і культиваторних лап без плоских лез. Фактично, чизельний стояк з вузьким наконечником (долотом) діє як зуб, що розриває ґрунт на глибину, лишаючи щілини. Зубчасті органи створюють *мінімальне порушення поверхні при максимальному глибокому проникненні*. Вони важливі для глибокого рихлення без обороту – наприклад, чизель-глибокорозпушувач може мати 5–7 стояків-зубів, які прорізають ґрунт на глибину 40 см вузькими щілинами з кроком ~50 см між ними, таким чином порушуючи плужну підошву і покращуючи дренаж.

Зубчасті пружинні борони (такі, як *штригельні борони*) складаються з декількох рядів довгих пружних зубців, які прочісують верхній шар на глибину 2–4 см. Вони дуже ефективні для руйнування ґрунтової кірки і вибирання проростків бур’янів на великих площах (напр. борона *ЛІРА* від “Лозівських Машин” має десятки пружинних зубів на ширині до 15 м). Зубчасті роторні органи – це, наприклад, *голчасті диски* (колеса із сталевими шипами), що використовуються в деяких міжрядних культиваторах для підрізання бур’янів і одночасного часткового підгортання землі до рядка.

Особливість зубчастих органів – їх вибіркова дія: кожен зуб обробляє лише вузьку смужку чи точку, тому для повного охоплення потрібна множина зубів і відповідний їх розподіл. В боронах зуби розташовують з певним кроком і зміщенням по рядах, щоб вся площа отримала рівномірне рихлення. В культиваторах-ропушувачах стояки-зуби розставляють так, щоб охопити площу при кількох проходах (інколи залишається необроблена гребінчаста структура поверхні, котра, втім, корисна проти ерозії).

Знос зубчастих органів проявляється у сточуванні та скругленні кінців зубів. Квадратні зубці борін тупляться і можуть втрачати форму зрізу, тому їх періодично перевертають іншою гранню вперед або змінюють. Пружинні зуби можуть втрачати пружність, ламатися на вигинах – їх теж треба оглядати і замінювати. Стояки чизельні зношуються менше, адже працюють “тілом” стійки, але змінні долота на їх кінці потребують заміни по мірі спрацювання.

1.1.5 Вплив конструкції робочих органів на якість обробітку та зношування

Конструкція і параметри робочого органу безпосередньо визначають *агротехнічну якість* виконання операції та *довговічність* самого органу. Кілька прикладів впливу конструктивних рішень:

- Форма плуга та якість оранки. Тип відвальної дошки (циліндрична, гвинтова, культурна тощо) впливає на розпад грудок і вигляд орного фону. Гвинтові полиці інтенсивніше кришать ґрунт, забезпечуючи дрібногрудочкувату структуру, тоді як циліндричні залишають більші брили, але швидше перевертають пласт. Вузькі корпуси (типу обротних європейських плугів) потребують більшої кількості корпусів на ту ж ширину захвату, але дають рівномірніший фон без гребенів. Наявність передплужників покращує загортання стерні – вони зрізають верхній шар і скидають його на дно борозни перед основним пластом, завдяки чому навіть при неглибокій оранці стерня повністю накривається.
- Кут атаки і проникнення. У дискових і лапових органів кут установки до напрямку руху визначає їх здатність врізатися в ґрунт. Оптимальний кут атаки диска (10–20°) дозволяє одночасно різати і перевертати ґрунт. Збільшення кута понад оптимум призводить до зайвого відкидання ґрунту убік і росту опору, зменшення – до гіршого заглиблення. Пружинні лапи і борони потребують правильного кута нахилу зуба: занадто вертикальний зуб “стрибатиме” по поверхні, занадто нахилений – надто заглиблюватиметься і забиватиметься. Тому виробники передбачають регулювання кутів (наприклад, в

дискових боронах кут батарей виставляється під поле, у пружинних боронах кут нахилу рамки з зубами можна міняти).

- Міцність і зносостійкість матеріалів. Робочі органи працюють у абразивному середовищі ґрунту, тому матеріал і термообробка критичні. Використання борованої сталі, як у сучасних плугах (*например, відвали із сталі 65G з бором*), подовжує строк служби відвала/лемеша в 1,5–2 рази порівняно зі звичайною вуглецевою. Застосування твердосплавних напайок на носку лемеша дозволяє довше зберігати гостроту різальної крайки, що безпосередньо впливає на якість різання пласта і рівномірність глибини. Дослідження показують, що спрацювання робочих органів (наприклад, сточений леміш чи лапа) *негативно впливає на якість обробітку і збільшує енерговитрати* – через тупі органи трактор витрачає більше пального, а глибина може бути нерівномірною. Тому сучасні органи часто роблять із змінними наконечниками: наприклад, долота чизельних стояків кріпляться болтами і можуть бути швидко замінені при зносі, стрілчасті лапи – теж змінні та недорогі.
- Вібрації та пружність. Пружні елементи у конструкції можуть підвищити ефективність руйнування ґрунту і знизити зношення. Так, багато культиваторних лап кріпляться до рами через *пружинні стояки*, які в процесі роботи вібрують. Мікровібрація лапи знижує налипання ґрунту і сприяє кращому дробленню грудок; до того ж, при наїзді на камінь стояк відхиляється і запобігає поломці лапи. В дискових боронах впроваджується амортизація стійок дисків (гумові втулки, ресорні стійки типу «Spring Flex» тощо) – це зменшує ударні навантаження на диск, продовжує його строк служби і дозволяє стабільніше підтримувати глибину в нерівному ґрунті
- Комбінація різних органів. Послідовне поєднання різних типів робочих органів в одному агрегаті дозволяє досягти кращої сумарної якості. Наприклад, у комбінованому культиваторі може стояти перший ряд дисків (ріжуть рештки і грудки), за ними – ряди лап (розпушують ґрунт на глибину), далі – пружинна борінка (вирівнює поверхню) і коток (ущільнює верхній шар

для збереження вологи). Кожен орган виконує “свою” функцію, і в результаті один прохід дає якість, близьку до проходу декількох різних машин по черзі. Звісно, такий складний агрегат потребує ретельного регулювання всіх робочих органів (глибини лап, кута дисків, тиску котка), аби вони працювали узгоджено.

На завершення слід підкреслити: правильний вибір типу робочого органу і параметрів його роботи є ключем до якісного обробітку ґрунту. Ґрунтообробні машини повинні підбиратися з урахуванням типу ґрунту, його стану (вологість, твердість), рельєфу поля, кількості пожнивних решток та поставленої агротехнічної мети. Тільки при оптимальному поєднанні “інструменту” і умов роботи можна досягти високої якості – рівномірної глибини розпушення без переущільнення, повного підрізання бур’янів, потрібного ступеню кришення ґрунту – при раціональних витратах пального і ресурсу техніки. Сучасні знання, накопичені конструкторською наукою та практикою експлуатації, дозволяють розробляти дедалі ефективніші ґрунтообробні машини, які забезпечують високу продуктивність та стале використання ґрунтових ресурсів.

1.2. Сучасні методи підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин

1.2.1. Загальна характеристика проблеми зношування робочих органів

Робочі органи ґрунтообробних машин (лемеші плугів, диски борін, лапи культиваторів, долота глибокорозпушувачів тощо) під час експлуатації інтенсивно зазнають абразивного спрацьовування. Взаємодія металевої поверхні з ґрунтом, що містить тверді мінеральні частки (пісок, дрібний камінь), призводить до поступової втрати матеріалу і зміни геометрії деталей. Абразивне зношування – домінуючий тип руйнування робочих органів у ґрунті . Додатково мають місце ударні навантаження (при наїзді на каміння або тверді грудки), адгезійне тертя в липких ґрунтах та корозійне спрацювання у вологому середовищі. Внаслідок цих процесів ріжучі кромки затуплюються, робочі

профілі деформуються, що погіршує якість обробітку ґрунту та збільшує тяговий опір агрегату.

Зношування робочих органів спричиняє значні економічні втрати. По-перше, скорочується строк служби деталей, що вимагає їх частої заміни або ремонту. Це означає прямі витрати на запасні частини та матеріали. По-друге, простої техніки на заміну зношених деталей призводять до втрати продуктивного часу в польових роботах. Згідно з дослідженнями, загальні річні втрати через знос сільгоспінструменту можуть сягати величезних сум – наприклад, у Канаді оцінювалися близько $940 млн щороку. В Австралії фермери витрачають понад $40 млн на рік лише на закупівлю і заміну лемешів-лап для культиваторів типу *sweep*. Зменшення ресурсу через зношення також затримує виконання агротехнічних операцій – наприклад, зволікання з оранкою чи посівом через заміну деталей може негативно вплинути на врожайність.

Підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробної техніки є однією з основних інженерних задач сучасного сільгоспмашинобудування. Актуальність проблеми зумовлена не лише необхідністю економії металу на виготовлення запасних частин, але й бажанням зменшити витрати на технічне обслуговування та простої машин через знос деталей. Довговічніші робочі органи дозволяють обробити більшу площу без заміни, підтримують оптимальні параметри обробітку (глибину, якість різання) протягом усього ресурсу і підвищують ефективність використання техніки.

Зважаючи на різноманітність умов роботи (типи ґрунтів, вологість, наявність абразиву, рельєф поля, швидкість руху агрегату тощо), механізм зношування може відрізнятися. Наприклад, у піщаних ґрунтах спостерігається надзвичайно інтенсивне абразивне стирання – дослідження показують, що більші розміри піщинок різко підвищують швидкість спрацювання металу. Водночас у важких глинистих чи вологих ґрунтах знос може проявлятися як налипання і полірування поверхні з утворенням плівок, або ж як корозійно-механічне спрацювання через агресивні компоненти ґрунтового розчину. Ударні

навантаження (каміння) можуть викликати втомні тріщини чи викришування твердих шарів. Отже, для ефективної боротьби зі зношуванням слід враховувати характер робочих умов і домінуючий вид зносу.

Проблема зношування має і енергетичний аспект. Збільшення шерехатості та зміна форми робочого органа під час спрацювання призводять до росту тягового опору ґрунтообробного агрегату. Затуплена лапа або леміш більше «розмазує» ґрунт, ніж ріже, що погіршує якість обробітку та вимагає більшої сили тяги трактора. Дослідження підтверджують, що застосування заходів зміцнення поверхні може зменшити тягове зусилля. Зокрема, лазерне загартування ріжучих граней сприяє формуванню на лемеші своєрідної «зубчатої» форми кромки, яка краще врізається в ґрунт і знижує опір руху. Таким чином, підвищення зносостійкості не тільки продовжує ресурс деталей, але й покращує енергоефективність та продуктивність ґрунтообробних машин.

Високий знос ґрунтообробного інструменту спонукає науковців до пошуку рішень для його зменшення. Протягом останніх десятиліть запропоновано багато підходів – від поліпшення конструкції (наприклад, застосування змінних ножів, самозагострювальних елементів) до використання нових матеріалів та технологічних методів зміцнення поверхні. Практика показує, що комплексний підхід – правильний вибір конструкційного матеріалу, оптимальна термічна обробка та нанесення захисних покриттів – дає найкращий результат. Нижче розглянуті сучасні методи підвищення зносостійкості робочих органів і їх класифікація.

1.2.2. Класифікація сучасних методів підвищення зносостійкості

Існує широкий спектр інженерних рішень для збільшення довговічності деталей, що працюють в абразивному середовищі ґрунту. Загалом ці методи можна поділити на конструктивні, технологічні та експлуатаційні. Конструктивні передбачають удосконалення форми та компоновки робочих органів (наприклад, установка змінних і самозаточуваних наконечників, рівномірний розподіл зносу по довжині леза тощо). Експлуатаційні полягають у

виборі оптимальних режимів роботи (помірні швидкості, правильна глибина обробітку), своєчасному обслуговуванні та зберіганні техніки, щоб мінімізувати додатковий знос.

Найбільше можливостей надають технологічні методи, коли за рахунок спеціальної обробки матеріалу досягається підвищення його твердості, міцності чи стійкості до спрацювання. Сучасні технологічні методи підвищення зносостійкості робочих органів включають:

- Термічну і термохімічну обробку – гартування, відпуск, цементація, азотування та інші режими обробки, що формують зносостійку структуру матеріалу в об’ємі чи на поверхні.
- Поверхневе зміцнення – локальне упрочнення зон, що спрацьовуються, шляхом наплавлення зносостійких сплавів, гальванічного хромування, дифузійного борування, нітроцементації тощо.
- Електроіскрове та плазмове легування – нанесення тонких надтвердих шарів матеріалу (карбідів, тугоплавких сполук) на поверхню деталі за допомогою електричних і плазмових розрядів.
- Нанесення захисних покриттів – використання зносостійких покриттів різної природи: керамічних, металевих, композиційних, у тому числі наноструктурних, отриманих методами напилення чи осадження.
- Застосування спеціальних зносостійких матеріалів – виготовлення робочих органів або їх частин з матеріалів із підвищеною стійкістю до зносу (боровмісні сталі, цементовані тверді сплави на основі карбідів, кераміки тощо).
- Сучасні адитивні технології – використання 3D-друку металами та пов’язаних технологій (лазерного наплавлення, холодного газодинамічного напилення) для ремонту зношених деталей і виготовлення нових з покращеними властивостями.

Нижче кожну з цих груп методів розглянуто детальніше.

Термічна та термохімічна обробка.

Правильний вибір і обробка матеріалу робочого органа багато в чому визначає його зносостійкість. Більшість ґрунтообробних деталей виготовляють зі сталей з підвищеним вмістом вуглецю та легуючих елементів (марганцю, бору тощо), які здатні набувати твердої загартованої структури. Наприклад, поширеними матеріалами для лемешів та лап є сталі типу 65Г, 60Г2 або борисні сталі (30MnB5 та аналоги), що після гартування мають твердість ~45…55 HRC. Така мартенситна структура забезпечує добру стійкість проти абразивного стирання, одночасно зберігаючи достатню в'язкість, щоб протистояти ударним навантаженням [4]. Боровмісні сталі вирізняються високою прокалістю: навіть порівняно великі деталі можна загартувати по всій товщині, отримавши міцний і твердий робочий шар.

Класична термічна обробка включає гартування з наступним відпуском, що дозволяє досягнути балансу твердості і в'язкості. Для тих зон деталі, де критично важлива твердість поверхні (ріжучі кромки), застосовують локальну термообробку: наприклад, індукційне загартування носка лемеша або крайок культиваторної лапи високочастотним струмом. Така обробка створює поверхневий шар мартенситу товщиною кілька міліметрів, тоді як серцевина залишається відносно в'язкою. В результаті деталь краще протистоїть спрацюванню, але не стає надто крихкою.

До термохімічних методів належать процеси дифузійного насичення поверхні різними елементами для отримання твердих структур. Широко використовується цементація (насичення вуглецем) з наступним гартуванням – так отримують поверхневий шар загартованого високовуглецевого мартенситу над м'якішим осердям. Нітроцементація (ціанування) створює загартований шар, насичений одночасно вуглецем і азотом, товщиною до 0,3–0,6 мм, що збільшує опір як абразивному, так і корозійному зносу. Азотування (у газовому середовищі або плазмі) формує тонкий (0,2–0,4 мм) надтвердий нітридний шар (твердість до 900–1100 HV) на сталі. Наприклад, азотовані деталі мають високу поверхневу твердість і зносостійкість при терті, хоча товщина зміцненого шару

невелика. Борування – насичення бором при ~900–1000°C – утворює на сталі надтвердий шар боридів заліза (твердість до 1600–2000 HV). Боридні шари вирізняються винятковою стійкістю проти стирання, але можуть бути крихкими; їх зазвичай застосовують, коли потрібен максимальний захист від абразиву і менше ударів.

Термічна і термохімічна обробка часто слугує базою для інших методів зміцнення. Правильно обраний режим гарту забезпечує оптимальну внутрішню структуру матеріалу, на яку потім можуть наноситися покриття чи наплавлення. За даними досліджень, навіть нові методи (лазерні, плазмові) доцільно порівнювати з базовою термообробкою. Так, лазерне гартування лемешів дало зниження інтенсивності зносу ~1,3–1,4 раза порівняно зі звичайним об’ємним гартуванням [8]. Це означає, що диференційована загартована структура ефективніше протистоїть спрацюванню на найбільш навантажених ділянках носка деталі. Термохімічні дифузійні методи теж помітно підвищують ресурс: азотування чи нітроцементація збільшують твердість поверхні сталі з ~45 HRC до еквіваленту ~60 HRC і більше, що покращує стійкість проти абразиву. Варто зазначити, що термозміцнені шари, як правило, зберігають геометрію деталі (ніякого додаткового матеріалу не додається, лише змінюється структура), тому аеродинаміка потоку ґрунту і форма ріжучої крайки залишаються заводськими. Це важливо, адже нанесення товстих покриттів чи наплавлень іноді може вплинути на форму деталі. Отже, грамотна термічна обробка – фундамент довговічності будь-якого робочого органу.

Поверхневе зміцнення (наплавлення, хромування, борування, нітроцементація)

Поверхневе зміцнення передбачає створення на найбільш зношуваних зонах деталі спеціальних шарів чи зон підвищеної твердості. На відміну від об’ємного гарту, тут акцент саме на поверхні, бо знос – це поверхневе явище. Розповсюдженим підходом є наплавлення – нанесення на поверхню деталі шару зносостійкого металу методом зварювання. Використовуються спеціальні

твердосплавні наплавочні матеріали (електроди, порошкові дроти), які утворюють після заварювання дуже тверду структуру з включеннями карбідів. Наприклад, наплавлення твердого сплаву типу ПС-14-60 з додаванням 6% карбіду бору (B_4C) на ріжучу крайку лемеша дозволило майже вдвічі (в 1,7–1,8 раза) знизити інтенсивність його спрацювання порівняно з базовою технологією індукційного гартування без наплавлення [4]. Тобто додатковий наплавлений шар значно подовжив життя деталі. Щоправда, процес наплавлення трудомісткий, і при заводському серійному виробництві його застосовують вибірково – переважно для дорогих чи критичних деталей. Натомість ремонтне наплавлення широко використовують у господарствах для відновлення зношених плужних лемешів або культиваторних лап: на напрацьовану деталь «наварюють» смуги твердого металу (найчастіше сплави з високим вмістом хрому, ванадію, ніобію, які дають карбідні включення великої твердості). Такі нашарування утворюють зубчастий мікрорельєф після часткового зносу м’якішого металу основи, завдяки чому інструмент певною мірою само-загострюється і довше тримає ріжучу здатність [2].

Наплавлення може проводитися різними способами: дуговим ручним (електродами), автоматичним під флюсом, напівавтоматом порошковим дротом, а також сучасними – плазмово-дуговим і лазерним. Від способу залежить глибина проплавлення основи та структура наплавленого шару. Новітні технології дозволяють отримати дрібнозернисті структури з рівномірно розподіленими карбідами. Наприклад, за даними Інституту електрозварювання ім. Патона, використання самозахисних порошкових дротів при напівавтоматичному наплавленні значно спрощує нанесення зміцнювального шару навіть на складні за формою деталі [9]. Отримані таким способом покриття можуть підвищувати зносостійкість у 1,5–2 рази порівняно з ненаплавленими деталямиir.polissiauniver.edu.ua.

Інший спосіб поверхневого зміцнення – гальванічні покриття. З них відомим є хромування – осадження шару твердого хрому гальванічним методом.

Хромовані поверхні мають твердість ~900–1000 HV і високу гладкість, що зменшує тертя. На практиці хромування робочих органів застосовується рідко (через крихкість шару та екологічні обмеження технології), але дослідження показали, що тонке хромове покриття здатне зменшити знос плужних лемешів. Приміром, в експериментах наплавлені та хромовані плуги демонстрували менше спрацювання і менший тяговий опір [3].

Згадані борування та нітроцементацію, якщо вони застосовуються локально. Борування, хоча і вимагає високої температури, дає дуже твердий приповерхневий шар. Наприклад, боровані плити культиваторів отримують твердість до 1600 HV, завдяки чому їх знос у піщаному ґрунті мінімальний. Проте боридний шар (товщиною 0,1–0,3 мм) є крихким; для погашення напруг іноді роблять двошарове борування або комбінують його з наступною термообробкою. Нітроцементація в середовищі газів чи розплавів дає менш твердий (800–900 HV) але товстіший (~0,6 мм) шар, сприятливий проти зносу. Вибір залежить від характеру навантажень: боридні шари ефективні проти чистого абразиву, але на кам’янистих ґрунтах можуть сколюватися; нітроцементовані більш «м’які», зате удар витримують краще.

Особливістю всіх поверхневих зміцнень є те, що вони змінюють лише тонкий приповерхневий шар, тоді як серцевина деталі залишається з попередніми властивостями. Це добре в плані збереження міцності та пластичності основи, але означає, що при повному стиранні зміцненого шару деталь швидко зношується далі. Тому глибина обробки має бути співмірною з очікуваним спрацюванням. Залежно від типу ґрунту та призначення інструмента, оптимальна товщина зміцненого шару може складати від десятків мікрон (для дуже твердих покриттів) до кількох міліметрів (для наплавлень).

Практика показує високу ефективність комбінування методів. Наприклад, після дифузійного насичення (цементації) можна зробити гартування – отримуємо одночасно твердий поверхневий прошарок і міцну основу. Інший приклад: після наплавлення деталь іноді піддають додатковому загартуванню

або відпуску для зняття внутрішніх напружень і покращення структури. Комплексний підхід до зміцнення дає змогу суттєво – в рази – підняти зносостійкість робочих органів.

Електроіскрове та плазмове легування поверхні

Електроіскрове легування (ЕІЛ) – це процес мікрозварювання, при якому на поверхню деталі імпульсними іскровими розрядами переносяться частинки матеріалу електрода. По суті, це електроіскрове напилення твердих сплавів. Деталь виступає одним електродом, а другий (анод) – виконаний з матеріалу, що потрібно нанести. При коротких розрядах (тривалість мікросекунди) поверхневий шар деталі розплавляється точково і змішується з розплавленими фрагментами анода. Внаслідок цього утворюється тонке (5–200 мкм) покриття, дуже міцно спаяне з основою [3]. Електроіскровим методом можна наносити карбідовмісні сплави, високохромисті сталі, тверді сплави типу ВК (WC-Co) тощо. В літературі наведено приклади підвищення ресурсу культиваторних лап за рахунок ЕІЛ: наносили покриття з швидкорізальної сталі (HSS), сплавів на основі заліза, кобальту з карбідами титану і вольфраму на носки культиваторних лап [4]. Отримані шари товщиною до 0,2 мм мали дуже високу твердість, що значно зменшило спрацювання лап при лабораторних випробуваннях. ЕІЛ дозволяє зміцнювати складні профілі та крайки з мінімальним тепловкладенням (деталь не перегрівається, бо імпульси короткі). Метод добре працює для точкового зміцнення найбільш навантажених ділянок – наприклад, ріжучих крайок, носків – де не потрібно покривати велику площу. До недоліків можна віднести відносно невелику продуктивність процесу та обмежену товщину зміцненого шару. Проте як економний спосіб підвищення твердості поверхні без суттєвої деформації деталі, електроіскрове легування знайшло застосування для інструменту, що працює в абразивному середовищі.

Плазмове легування – ширший термін, що може включати кілька схожих процесів. Один з них – це плазмово-дугове наплавлення порошку (плазмове напилення з оплавленням), коли порошковий дріт або порошок твердого сплаву

подається у зону горіння плазмової дуги і розплавляється на поверхні деталі. Інший різновид – плазмове азотування (іонно-плазмова обробка в розрядному розрідженому газі), де за рахунок плазмових розрядів азот впроваджується в поверхню металу. В українських роботах під плазмовим легуванням часто розуміють саме плазмове наплавлення з оплавленням основи, що утворює сплавлений зміцнювальний шар. Наприклад, досліджували плазмове оплавлення попередньо нанесених покриттів: спочатку деталь покривається напиленням (скажімо, порошком Fe-C-Cr-Ti-Al), а потім обробляється плазмовим факелом, який плавить і приварює це покриття до основи. Таким методом отримували композиційні покриття із дрібнокристалічною структурою, чия зносостійкість в 1,5–2 рази перевищувала звичайні напилені покриття без оплавленняir.polissiauniver.edu.ua. Плазмово-детонаційні процеси також дозволяють легувати поверхню вибуховими імпульсами, формуючи загартовані приповерхневі шари (імпульсне зміцнення) [3].

В контексті сільгосптехніки ці технології ще є об’єктом досліджень, але вони перспективні. Плазмові методи дають можливість отримати глибоко проникний, суцільний шар сплаву з мінімальними дефектами. На відміну від традиційного зварювального наплавлення, плазмове може забезпечувати більш рівномірне змішування матеріалу присадки з основою і дрібнішу структуру. Це підвищує опір абразиву і удару. Деякі роботи повідомляють, що плазмове зміцнення здатне збільшити ресурс лемешів і культиваторних лап у 1,5 раза і більше навіть за тонкого шару покриттяir.polissiauniver.edu.ua.

До плазмових методів можна віднести і термічне напилення (плазмове напилення) керамічних і металевих порошків, про що детальніше в наступному розділі. Тут же підкреслимо, що іскрові та плазмові легування – це способи значно підвищити твердість поверхні за рахунок введення в неї тугоплавких сполук чи створення нових фаз. Їх ефективність залежить від правильного підбору матеріалу електрода/порошку: наприклад, титано- та вольфрамовмісні покриття показали відмінні результати на лапах культиваторів [3]. Також

важливо, що ці методи мінімально впливають на габарити деталі – товщина шару вимірюється десятими або сотими частками міліметра, тому форма робочого органу залишається фактично оригінальною.

Нанесення покриттів (керамічні, металеві, композитні, нанопокриття)

Методи покриттів охоплюють значну групу технологій: від гальваніки та фарб до високотехнологічних методів осадження плівок у вакуумі. Стосовно підвищення зносостійкості нас цікавлять тверді зносостійкі покриття, які можна нанести на робочі поверхні. Вибір матеріалу покриття може бути різним:

- Керамічні покриття – оксидні (наприклад, оксид алюмінію Al_2O_3, оксид цирконію), карбідні та нітридні (нітрид титану TiN, карбід кремнію SiC тощо). Вони надзвичайно тверді і стійкі до абразиву. Зазвичай наносяться або методом термічного напилення (плазмово-дугового або детонаційного), або методами фізичного/хімічного осадження з парової фази (PVD/CVD). У дослідах з ґрунтообробними інструментами є приклади покриття плужних лемешів тонкою плівкою TiN методом вакуумного іонно-плазмового нанесення [2]. Такі покриття значно підвищили їхню зносостійкість і зменшили тертя з ґрунтом (TiN відомий своїм низьким коефіцієнтом тертя) [2]. Також повідомляється про успішне нанесення багатошарових наноструктурних нітридних покриттів (TiAlN, TiCrN та ін.) на культиваторні лапи, що дало помітне зниження зносу [3]. Керамічні покриття, нанесені плазмовим напиленням (наприклад, Al_2O_3), також показали зменшення спрацювання плужних ножів [7].
- Металеві покриття – це, як згадано, гальванічні (Ni, Cr) або напилені металеві сплави. Окремо варто виділити покриття твердими стопами на основі кобальту (наприклад, stellite). Стелітові сплави (Co-Cr-W-C) поєднують високу твердість з достатньою в’язкістю і відомі як матеріал для наплавки різальних інструментів. Сучасні технології дозволяють наносити стеліт і подібні матеріали як покриття – зокрема, методом лазерного наплавлення або HVOF (високошвидкісного газополуменевого напилення). У дослідженнях дискових борін для підвищення їх ударно-абразивної стійкості перспективним визнано

нанесення композиційних шарів на основі Stellite-6 з додаванням карбіду вольфраму (WC) лазерним наплавленням [12]. Такі шари зміцнюють мікроструктуру поверхні і підвищують опір ударам, збільшуючи ресурс диска. Зокрема, порівняння серійних дисків та дисків із лазерно-наплавленим Stellite-6+WC показало суттєве (в рази) зменшення масового зносу останніх після обробки визначеної площі поля. На рис. 1.3 наведено приклад різних ґрунтообробних знарядь та деталей, що зазнають зносу: серед них і дискові ножі борони, до яких застосовано плазмове напилення покриття (схематично показано на діаграмі).

Рис. 1.3. Приклади ґрунтообробних робочих органів, що потребують зносостійкості: a) плуг, b) диск борони, c) долото культиватора, d) лемеш плуга, e) ротаційний ніж, f) плужні лемеші (один із них із зношеним носком).

Застосування захисних покриттів (наприклад, плазмовим напиленням кераміки чи нітридів) на таких деталях істотно підвищує їх довговічність.

Композиційні покриття – це покриття, що складаються з кількох фаз або компонентів. Наприклад, металокерамічні (когезійна матриця з твердими керамічними включеннями). Такі покриття можуть наноситися у вигляді сумішей порошків. Відомий приклад – термопластичні композиційні покриття на основі полімеру, наповненого твердими частками (скловолокно, оксидні та металеві порошки). У дослідженні Ali et al. культиваторні лапи покривали композитом із поліаміду, наповненого сумішшю SiO_2, Al_2O_3, скловолокна та ін., товщиною ~1 мм [3]. Таке покриття зменшувало налипання ґрунту і захищало основу від прямого контакту з абразивом, підвищуючи ресурс. Інший тип – еластомерні або поліуретанові покриття, що амортизують удари і захищають від корозії. Хоча самі полімери м’якші за метал, вони можуть знижувати тертя і сповільнювати знос основного металу (за рахунок принципу «м’яка шуба бере на себе абразив»). Композиційні покриття знаходять застосування радше в специфічних випадках (для зменшення тертя чи налипання), проте комбінування твердих часток з в’язкою матрицею – перспективний напрям.

Нанопокриття – під цим зазвичай розуміють плівки або багатошарові структури з товщиною шарів у нанометровому діапазоні, які характеризуються особливими властивостями (надтвердість, високий опір тріщиноутворенню тощо). Прикладом можуть слугувати нанокомпозитні покриття типу TiAlSiN – це твердий нітрид з нанорозмірними зернами різних фаз, що досягає надтвердості >40 ГПа. Такі покриття вже використовуються у різальному інструменті. Для сільгосптехніки їх тільки починають випробувати. Повідомляється, що покриття TiAlSiCN (наноструктурований карбонітрид титану-алюмінію-кремнію) успішно нанесли методом вакуумного дугового осадження на дискові ножі та лапи і отримали значний виграш у зносостійкості [5]. Наношари мають високу адгезію та можуть краще протистояти утворенню мікротріщин за рахунок внутрішньої компресійної напруги та зернограничного

зміцнення. Хоча технологія отримання таких покриттів дорога, у майбутньому вона може знайти застосування для критично важливих компонентів (наприклад, деталей посівних комплексів, які працюють у ґрунті з великою швидкістю і мають бути особливо зносостійкими).

Важливим аспектом є адгезія покриттів до основи. Для грубих умов експлуатації (удари, вигини) недостатньо просто мати твердий шар – він має міцно триматися на деталі. Тому технології передбачають підготовку поверхні (піскострум, грунтувальні прошарки), оптимізацію товщини тощо, щоб покриття не відшарувалося під час роботи. Деякі покриття (наприклад, плазмове напилення) потребують додаткового плавлення або запікання, щоб закріпитися. При дотриманні технології сучасні покриття демонструють високу ефективність: за даними огляду Malvajerdi (2023), нанесення зносостійких шарів різними способами (PVD, плазмове напилення, гальваніка тощо) у багатьох випадках дозволяло знизити знос ґрунтообробного інструменту в рази [3]. Наприклад, в одному з дослідів сумарне спрацювання покритого плуга на площі 10 га було в 2,5 рази меншим за непокритий [5]. Таким чином, правильно підібране покриття може радикально подовжити строк служби деталі.

Використання зносостійких матеріалів (боровмісні сталі, тверді сплави, кераміки)

Один з найпростіших шляхів – виготовити робочий орган із матеріалу, що сам по собі має підвищену зносостійкість. Історично для плугів і культиваторів завжди шукали «кращу сталь». Сучасний стан – це широке застосування сталей, легованих бором, марганцем, хромом. Як зазначалося, борвмісні сталі після правильної термообробки забезпечують високу твердість і достатню в’язкість, перевершуючи звичайні сталі У8-У10. Додавання 0,002–0,003% бору дозволяє прокалити товсті секції, отже, навіть масивний леміш може мати весь об’єм загартованим. Вміст ~0,3% хрому і ~1,2–1,5% марганцю додатково підвищує твердість і зносостійкість за рахунок твердих карбідних фаз [7]. В таблиці 5 джерела наведено приклад складу сталі для плуга: 0,3% C; 1,3% Mn; 0,34% Cr;

невеликі добавки Ni, Mo, V, Cu; твердість після обробки ~HV1 433 (≈45 HRC). Такий матеріал має добру стійкість до механічного спрацювання і одночасно достатню міцність, що й робить його популярним для робочих органів.

Інший підхід – застосування спеціальних зносостійких сплавів. У гірничій та дорожній техніці відомі сталі типу Hardox, RAEX – із підвищеним вмістом вуглецю (0,4% і більше) та легуванням (Cr, Mo, Ni), гартовані до твердості 400–500 HB (≈ 42–50 HRC). Вони мають відмінну абразивну стійкість. Деякі українські виробники переймають цей досвід: наприклад, товсті стійки та рами ґрунтообробних агрегатів починають виготовляти з Hardox 450 замість звичайної конструкційної сталі, щоб продовжити їх ресурс у контакті з ґрунтом. Для активних робочих деталей (ножів, лап) Hardox теж може застосовуватися, але треба враховувати його низьку пластичність – при сильному ударі така сталь може тріскатися. Тому часто йдуть на компроміс: деталь виготовляють з більш в’язкого матеріалу, а вже поверхню зміцнюють наплавленням чи вставками з надтвердого матеріалу.

До надтвердих матеріалів, що радикально підвищують ресурс, належать цементовані тверді сплави – наприклад, карбід вольфраму з кобальтовою зв’язкою (VK8, VK15 і подібні). Ці матеріали (відомі як «побідит») мають твердість ~88–92 HRA (~1300–1800 HV) і здатні різати каміння. В техніці їх застосовують у вигляді вставок або накладок: пластинки карбіду вольфраму впаюють або приклеюють до робочих крайок деталей, що потребують екстремальної довговічності. В аграрній галузі це поки не масово, але набуває популярності. Зарубіжні компанії пропонують лемеші плугів, долота культиваторів і наконечники сошників, укріплені твердосплавними напайками. Наприклад, John Deere для своїх культиваторних лап випускає серію *PLUS Sweeps* – на їхні крила, носок і шийку нанесено композиційний сплав з вольфрамовим карбідом, що забезпечує надзвичайну зносостійкість [5]. Такі лапи служать у 2–3 рази довше, ніж звичайні без покриття [2]. Аналогічно, європейські фірми (Lemken, Horsch, Kverneland) пропонують карбідозміцнені

версії деталей: наприклад, у Lemken всі стандартні лапи культиватора покриті твердосплавним наплавленням (наплавка з підвищеним вмістом карбідів), а для особливо тяжких умов можна придбати варіант із вставками з карбіду вольфраму, що дає особливо довгий строк служби [2]. Вироби з твердосплавними елементами зазвичай дорожчі, однак виграють у довговічності в кілька разів. Так, додавання пластин карбіду вольфраму здатне збільшити строк служби лапи культиватора в 4–10 разів порівняно зі звичайною сталевою після термообробки [2]. Це підтверджують і дані виробників: за оцінками, карбідні робочі органи працюють щонайменше в 5 разів довше, дозволяючи фермерам економити на кожному гектарі за рахунок рідшої заміни і стабільної глибини обробітку [1].

Ще один клас матеріалів – технічні кераміки (оксидні, карбідні). Вони мають надзвичайну твердість і термостійкість. Проте в чистому вигляді кераміка крихка, тому використовується рідко. Були спроби виготовляти, наприклад, змінні ножі з пресованого карбіду кремнію чи оксиду алюмінію, але на практиці при ударних навантаженнях (каміння) такі ножі можуть руйнуватися. Тому частіше кераміки застосовують як компоненти покриттів або композитів (див. попередній розділ). Перспективним є зміцнення сталевих деталей керамічними елементами в литві або пайці – так звані металокерамічні наплавки, коли в шар наплавленого металу вводяться гранули карбідів (WC, TiC, Al_2O_3 тощо). При наплавленні цей порошок не встигає розплавитись і «вмуровується» в металеву матрицю, утворюючи подібність мозаїчного твердого каменю. Наприклад, технологія CASTODUR дозволяє одержувати покриття, де карбід вольфраму (дуже твердий, але крихкий) оточується в’язкою основою, що гасить удари. Такі покриття добре працюють на екскаваторних зубах, ковшах – тобто в умовах, подібних до сільгосп ґрунтообробки. Тому є підстави впроваджувати їх і для плугів чи культиваторів.

Підсумовуючи, використання зносостійких матеріалів або вставок з них – ефективний, хоча й дорогий шлях. Тверді сплави дають максимальну економію в

умовах екстремального зносу: коли звичайна сталь спрацьовується за день, карбідна пластина може працювати тижнями. Проте, якщо умови не такі важкі, інколи вигідніше застосувати дешевшу сталь з покриттям чи наплавленням, ніж відразу тверді сплави. Вибір матеріалу завжди компроміс між ціною і потрібним ресурсом.

Сучасні адитивні технології та 3D-друк металами

Адитивні технології відкрили нові можливості в ремонті та виготовленні деталей. Для боротьби зі зношуванням вони цікаві тим, що дозволяють додавати матеріал там, де він відсутній чи спрацювався. Замість традиційного знімання металу (при механічній обробці), адитивні методи нарощують його, формуючи потрібну форму. В контексті ґрунтообробних робочих органів це використовується двома способами:

1) Ремонт зношених деталей (відновлення геометрії). Замість того, щоб викидати зношений леміш або ніж, його можна відновити, наростивши матеріал на спрацьовані зони. Раніше це робили зварювальники вручну (наприклад, наплавляли електродом кромку лемеша і обточували її). Сучасні технології – лазерне наплавлення дротом або порошком – дозволяють робити це більш якісно. За допомогою CNC-управління лазер наносить шар металу точно за моделлю, відновлюючи первісну форму деталі з точністю до міліметра. Причому наплавляти можна не просто сталлю, а зносостійким сплавом – таким чином, відновлена ділянка може стати навіть міцнішою за нову. Наприклад, в Китаї пропонують лазерно-наплавне обладнання, яке спеціально призначене для ремонту плугів і лопат землерийної техніки: порошок із твердим сплавом подається в зону лазерного променя, плавиться і наноситься на поверхню плуга, утворюючи зносостійкий шар [2]. Отриманий лазерним наплавленням шар має високий рівень адгезії (металургійне з’єднання з основою) та мінімум дефектів, оскільки процес прецизійно керований. Практика показала, що лазерне відновлення плугів і культиваторних лап може продовжити їх службу в 2–3 рази навіть порівняно з новими деталями, якщо використовувати сплав з карбідними

включеннями. Крім лазера, для ремонту використовують і дугові адитивні процеси – так зване WAAM (Wire-Arc Additive Manufacturing), коли деталь «додруковують» звичайною зварювальною головкою за заданою траєкторією. Так, можна відновити, наприклад, зношений отвір або кріплення на стійці, точно наростивши відсутній метал. Перевага адитивного ремонту – економія матеріалу і часу: не треба виготовляти нову деталь з нуля, достатньо доповнити стару. Знижується і відходність – що відповідає тенденціям екологічної сталості виробництва [3].

2) Виготовлення нових деталей з покращеною геометрією і структурою. 3D-друк металевих виробів (методами лазерного плавлення порошку – SLM, електронно-променевого плавлення – EBM, або осадження дроту/порошку – DED) дає змогу створювати деталі складної форми, внутрішньої структури і з градієнтними властивостями. Для зносостійких робочих органів це означає, що можна спроєктувати деталь, в якій різні зони мають різні властивості. Наприклад, шляхом керування складом порошку під час друку можна отримати леміш, у якого ріжуча крайка надрукована з надтвердого сплаву, а решта корпусу – з більш в’язкого металу, що гасить удари. Такі перехідні матеріали («functionally graded materials») дуже актуальні для задач абразивного зносу. Адитивно виготовлені частини не мають обмежень традиційних технологій (ковки чи литва), тому можуть включати внутрішні порожнини, ребра, які знижують вагу, але не послаблюють деталь. Вже зараз великі виробники сільгосптехніки застосовують 3D-друк для прототипів і складних вузлів – переважно для оптимізації конструкції, а не зносостійкості. Але є приклади, коли *запасні частини друкуються на вимогу*, щоб замінити зношені, особливо у віддалених регіонах [7]. Перспектива полягає в тому, що фермер чи сервісний центр зможе оперативно «виготовити» потрібну деталь зі спеціального порошку, замість чекати постачання. Якщо ж цей порошок – зносостійкий сплав, то надрукована деталь може мати довший строк служби.

Адитивні технології включають і холодне газодинамічне напилення (cold spray), коли частинки порошку прискорюються до надзвукових швидкостей і вдаряються об деталь, приварюючись механічно. Цей метод годиться для м’яких матеріалів (алюміній, мідь), але нині розробляють його і для твердих покриттів. Можливо, в майбутньому в польових умовах дрон чи портативна установка зможе «обдути» леміш карбідним порошком, миттєво відновивши його покриття. Поки що ж, на практиці більш реально використовуються лазерні ремонті станції. В Україні також впроваджуються подібні технології на ремонтних заводах: наприклад, для відновлення валів, гідроциліндрів – і це можна перенести на сільгоспдеталі. Серед переваг лазерного наплавлення: мінімальна зона термовпливу (отже, деталь не веде, не деформується), міцне зчеплення, можливість автоматизації та точної локалізації наплавки лише там, де потрібно [5].

На рис. 2 показано реальний приклад сучасного культиваторного наконечника, виготовленого з використанням комбінованих технологій зміцнення: носик оснащено твердосплавною пластиною з карбіду вольфраму, а вздовж ребер виконано наплавлення хромовмісним зносостійким сплавом. Така конструкція значно перевершує звичайний цільносталевий наконечник за ресурсом у важких умовах (кам’янистий ґрунт), оскільки карбідні вставки витримують абразив, а наплавка захищає боки від стирання. Подібні вироби стають доступними саме завдяки розвитку технологій точного позиціонування і зварювання – зокрема, деякі елементи можуть встановлюватися автоматизовано при виготовленні.

Рис. 1.2. Лапа культиватора Strip-Till з твердосплавним зміцненням.

На носку вбудована пластина з карбіду вольфраму (сріблястий елемент), а ріжучі крайки армовані наплавленим шаром сплаву на основі хрому. Такий комбінований підхід подовжує термін служби деталі у 4–10 разів проти стандартної (рис. 1.2).

Таким чином, адитивні методи доповнюють класичні способи підвищення зносостійкості. Вони особливо корисні для складнопрофільних, дорогих деталей, де звичайні методи важко застосувати. 3D-друк і лазерне наплавлення дозволяють гнучко реагувати на проблему зношування: відремонтувати потрібну зону або покращити конструкцію, не перебудовуючи весь виробничий процес. Це одна з причин, чому великі компанії інвестують у адитивні технології для сільгоспмашин – очікується, що вони скоротять час простою і оптимізують витрати на запасні частини у майбутньому.

1.2.3. Приклади практичного впровадження методів підвищення зносостійкості

Сучасні виробники сільськогосподарської техніки активно впроваджують описані вище методи, щоб підвищити конкурентоздатність своєї продукції. Розглянемо кілька прикладів як українських, так і зарубіжних компаній.

Вітчизняні виробники. В Україні проблемі зносу приділяють увагу як науковці, так і самі заводи. Приміром, ПАТ “Ельворті” (раніше “Червона Зірка”) для плугів і культиваторів застосовує бористу сталь 65Г з гартуванням, що забезпечує твердість близько 50 HRC на робочих органах. Це стандартна практика, що значно перевищує ресурс деталей із звичайної сталі без легування. “Лозівський ковальсько-механічний завод” (бренд *Lozova Machinery*) повідомляв про впровадження нових технологій термічного зміцнення зубів борін. Зокрема, боронові зуби їхніх шлейф-борін проходять об’ємне гартування з високою стабільністю властивостей, а у конструкцію введені пружинні елементи, що захищають зуб від надмірних ударних навантажень. Як наслідок, незалежні випробування засвідчили, що зуби борін Lozova Machinery мають найвищу зносостійкість серед протестованих аналогів – демонструють мінімальний знос і деформацію при однаковій площі обробітку. Це приклад комплексного підходу: якісний матеріал + термообробка + вдале конструктивне рішення (амортизація пружиною) дали синергічний ефект.

Інший український приклад – ННЦ “ІМЕСГ” розробляв конструкції плуга з додатковим захистом лемеша: було запропоновано леміш з переривчастим наплавленням твердого сплаву на ріжучу кромкуЦе рішення нагадує зубчастий ніж: твердий сплав наноситься фрагментами, і в процесі роботи форма леза стає хвилястою (через різницю зносу наплавлених та ненаплавлених ділянок). Випробування показали, що така хвилясто-зубчаста кромка значно зменшує лінійний знос і подовжує строк служби лемеша. Хоча виготовлення такого лемеша дещо складніше, він є прикладом успішного застосування наплавлення для підвищення довговічності. На жаль, масового виробництва ця конкретна конструкція не набула (через трудомісткість), але розробки лягли в основу інших рішень.

Важливо згадати, що провідні вітчизняні підприємства агромашинобудування співпрацюють з науковими установами для впровадження інновацій. Наприклад, в ХНАУ ім. В. Докучаєва та НУБіП України проводились

дослідження комбінованих покриттів для лап культиваторів – поєднання лазерної термообробки і композиційного покриття дало зменшення зносу носка лапи більше ніж у 1,5 раза. Такі результати поступово впроваджуються у дослідні зразки техніки.

John Deere (США). Компанія Джон Дір – один з лідерів галузі – пропонує своїм клієнтам цілу лінійку зносостійких деталей, маркованих як *Extended Wear*. Зокрема, для культиваторів John Deere доступні змінні лапи Plus Sweeps зі спеціальним покриттям. На їх робочі поверхні (носок, крила, шийка) нанесена суміш на основі карбіду вольфраму за власною технологією Deere. За даними компанії, такі лапи служать у 2–3 рази довше за стандартні, тобто мають на 200–300% більший ресурс. Це досягається за рахунок надтвердих включень карбіду, що майже не зношуються від піску. Крім того, John Deere пропонує опцію *Xtra Life (XLT)* – порошкове карбідне напилення на лапи, яке теж продовжує їх роботу, особливо в піщаних ґрунтах. Цікаво, що виробник відзначає: використання таких зносостійких лап не тільки економить гроші на заміні, а й знижує час простоїв (рідше треба міняти) і забезпечує стабільну ширину захвату та глибину обробітку протягом довшого часу. Також у John Deere впроваджено систему Perma-Loc™ – швидкозмінне кріплення для лап, яке само по собі не підвищує зносостійкість, але мінімізує час, коли все ж треба міняти лапи. Це приклад інтегрованого рішення: надміцні лапи + зручне кріплення підвищують загальну ефективність агрегату.

Lemken (Німеччина). Компанія Lemken відома своїми інноваціями в галузі ґрунтообробних знарядь. В плані зносостійкості вони використовують декілька рівнів захисту. По-перше, усі змінні полички і наконечники культиваторів Lemken мають базове твердосплавне наплавлення по крайках (hard-faced as standard).. Це захищає деталь з перших годин роботи. По-друге, для важких умов Lemken пропонує версії з карбідними пластинами – наприклад, крильчаті лапи *DeltaCut* або наконечники для культиватора Karat можуть бути у варіанті з напаяними пластинами карбіду вольфраму.Такі деталі позначають як *carbide*

version і їхній ресурс у кілька разів перевищує стандарт. Lemken у рекламних матеріалах наводить цифру, що карбідні лемеші служать у 5 разів довше звичайних. Крім того, у Lemken приділяють увагу самозагострюванню: деякі їхні лапи мають форму, що при спрацюванні зберігає кут загострення. Наприклад, лапи *Durastar* оснащені вставками так, що по мірі зношування залишається гостра крайка, яка формується із наплавленого твердого металу. Це підтверджує принцип: рівномірне зношування по довжині леза бажане – його реалізують або конструктивно, або застосуванням локальних зміцнень.

Kuhn, Horsch та інші. Багато відомих брендів мають аналогічні рішення. Французька Kuhn, наприклад, для своїх глибокорозпушувачів пропонує наконечники з твердосплавними пластинами і маркетує їх як *Carbide*. Також Kuhn застосовує спеціальну тришарову термічну обробку дисків (*Triplex*), де поверхні дуже тверді, а сердцевина в’язка – диск менше лопається на ударах. Німецька Horsch для культиваторів Cruiser і Terrano має систему змінних доліт: можна ставити просте долото, або долото з накладкою із карбіду вольфраму – відповідно залежно від умов. В їхніх проспектах згадується, що карбідний наконечник працює в піску у 4–7 разів довше. Компанія *Agricarb* (Франція) спеціалізується на виробництві універсальних змінних ножів з карбідними вставками, сумісних з технікою різних брендів – їх продукцію (карбідні лемеші, лапи) використовують фермери для модернізації навіть старих плугів. Це говорить про велику практичну цінність технології: навіть якщо завод не випустив карбідний аналог, ринок післяпродажного обслуговування його створює, бо попит на довговічні частини високий.

Застосування в Україні іноземних технологій. Українські агропідприємства часто експлуатують імпортну техніку і вже мали змогу оцінити переваги зносостійких рішень. Наприклад, відзначається, що в умовах південних степів (де багато піску) карбідні долота Horsch служать набагато довше звичайних: якщо звичайне долото треба було міняти після ~100 га, то карбідне працює 300–400 га без критичного спрацювання (умовні цифри зі слів механізаторів).

Також позитивні відгуки отримали американські долота Nichols, які мають наплавку з карбідів хрому – вони показали 2–3-кратний ресурс проти вітчизняних стандартних. Це стимулює і українських виробників впроваджувати аналогічні рішення, щоб не відставати.

Узагальнення практики. Практичний досвід свідчить: методи підвищення зносостійкості найефективніші, коли їх поєднувати. Кращі результати дають комбіновані рішення: якісний матеріал + термообробка + покриття або вставки. Так, John Deere спочатку виготовляє лапу з борованої сталі (міцна основа), потім загартовує її (тверда структура), а потім додає карбідне покриття (екстремальна твердість зверху). Аналогічно діють й інші топ-виробники. В українських реаліях також починають застосовувати багато із згаданих методів: ремонтні бригади виконують наплавлення ковшів і плугів, на заводах пробують лазерне зміцнення, університети досліджують нові матеріали. Нижче, у розділі 4, проаналізовано ефективність різних підходів та рекомендації щодо їх вибору залежно від умов експлуатації.

Порівняльна ефективність методів і вибір залежно від умов роботи.

Кожен із описаних методів має свої сильні і слабкі сторони. Ефективність їх може різнитися залежно від характеру зношування, типу ґрунту, інтенсивності навантажень та навіть економічних чинників (вартість реалізації методу). Розглянемо порівняльно основні методи і коли доцільно їх застосовувати.

Термічна обробка vs. покриття. Загартування і термохімія – базові методи, які відносно недорогі і застосовні практично до всіх деталей. Вони дають підвищення ресурсу на 20–50% (в 1,2–1,5 раза) порівняно з незагартованою деталлю. Цього може бути достатньо для помірних умов – скажімо, глинисті або чорноземні ґрунти із невисоким вмістом піску. Тут надтверді покриття можуть і не знадобитися, бо знос не настільки катастрофічний. Натомість у дуже абразивних ґрунтах (піщаних, супісках) однієї термообробки мало: хоча твердий мартенсит повільніше зношується, але й він стирається досить швидко. У таких випадках ефективніші додаткові покриття чи наплавлення. Тонкі покриття

(PVD/CVD) з нітридів титану, алюмінію тощо показують чудові результати в лабораторних тестах на тертя, але їх слабке місце – обмежена товщина. В полі тонке (кілька мікрон) покриття може стертися за кілька годин, і далі деталь працюватиме як звичайна. Тому тонкі надтверді покриття доцільні, якщо знос відносно неглибокий і основна мета – зменшити тертя і початкове спрацювання. Для тривалої роботи краще товстіші зміцнення – дифузійні шари (сотні мікрон) або наплавлення (міліметри). Отже, для тривалих впливів абразиву обирають дифузійне зміцнення чи наплавлення, а для зменшення тертя і захисту від корозії – тонкі покриття.

Наплавлення vs. тверді вставки. Наплавлення створює поверхню, яка поступово зношується разом з деталлю, часто самозагострюючись (через неоднорідність). Це добре для лемешів, лап, які повинні завжди мати ріжучу кромку. Наприклад, як згадувалось, наплавлення смуг твердого сплаву формує зубці, що врізаються в ґрунт і зменшують опір. Ударна в’язкість наплавленого металу зазвичай вища, ніж у твердих пластин – тому наплавлені деталі краще витримують ударні навантаження (наприклад, каміння). Твердосплавні ж пластини (карбідні) – дуже тверді, але крихкі. Якщо робочий орган натрапить на камінь, пластина може сколотися або відвалитися, особливо якщо адгезія недостатня. Тому для кам’янистих ґрунтів часто радять не крайній «карбід», а проміжне рішення – сплав із високим вмістом карбідів, наплавлений на в’язку основу (тобто т.зв. хромові наплавки або металічні матриці з карбідами). Вони трохи швидше зношуються, зате не ламаються від ударів. З іншого боку, для дуже піщаних рівних полів (де ударів мало, лише абразив) – найкраще *карбідне укріплення*, бо його твердість неперевершена, і якщо немає сильних ударів, пластини будуть сточуватися дуже повільно. Практика підтверджує: в пісках карбідні лапи служать до 10 разів довше, але в кам’янистому ґрунті їхній виграш менший (можливо 3–5 разів) через втрати від відколів.

Кераміка vs. метал. Керамічні покриття мають ніби нульове тертя з кварцовим піском – адже оксид алюмінію майже такий же твердий, як кварц, і

стирається дуже повільно. Але під навантаженням крихка кераміка тріскається. Металеві наплавки, хоча й м’якші, проте поглинають удар і зношуються рівномірніше. Тому компромісом є металокераміка – карбіди у в’язкій матриці. Такий підхід (наприклад, Stellite + WC) дав чудові результати: покриття не тільки зносостійке, а і витримує удари, що доведено випробуваннями в полі на 140 га – інструмент з покриттям Stellite-6/WC втратив значно менше маси, ніж без покриття. Отже, композитні рішення – одні з найефективніших, хоча і технологічно складні.

Адитив vs. традиційне виготовлення. 3D-друк дозволяє інтегрувати різні матеріали, але поки що вона дорога і повільна для масових деталей. Навряд чи найближчим часом стане рентабельно друкувати всі плужні лемеші на принтері. Проте для ремонту дорогих вузлів (скажімо, рама плуга, важіль, що зносився в шарнірі) адитивні методи вже окуповуються – бо дозволяють уникнути купівлі всього вузла. Також 3D-друк дає геометричну свободу – наприклад, можна розробити лапу оптимальної аеродинамічної форми, яку неможливо викувати чи вирізати традиційно, і надрукувати її. Якщо така форма зменшить опір і знос, вона може виправдати витрати. Тому у специфічних випадках адитив – незамінний (для складних форм чи матеріалів, яких інакше не отримати), але для простих деталей поки що традиційні методи дешевші.

Вартість і економічний ефект. Не можна оминути питання ціни. Методи на кшталт гартування чи цементації додають 10-20% до вартості деталі, тоді як карбідні вставки можуть подвоїти або потроїти ціну. Тому фермер оцінює: якщо вставка дає 5-разове збільшення ресурсу, а коштує в 3 рази дорожче, це вигідно – бо зменшуються простої і трудовитрати на заміну. За розрахунками Agri-Linc (британського постачальника запчастин), твердосплавні частини є економічно вигідними в довгостроковій перспективі: хоча їхня початкова ціна вище, вони служать настільки довше, що в перерахунку на гектар обходяться дешевше. До того ж, вони покращують якість роботи (довше зберігають форму, не «розмазують» ґрунт тупою крайкою). Умови, де економія найбільш суттєва – це

великі господарства з великим напрацюванням, особливо на зносних ґрунтах. Там витрати на преміальні деталі окупаються. Малим фермерам на легких ґрунтах, можливо, немає сенсу переплачувати – їм достатньо стандартних зміцнених термічно деталей.

Залежність від типу ґрунту. Узагальнимо рекомендації:

- Для піщаних, супіщаних ґрунтів (високий абразив): найкраще показують себе методи з найвищою твердістю – карбідні покриття, боридні шари, керамічні напилення. Їх можна поєднувати з базовим гартом. Нітридні покриття теж ефективні, хоча вони тонкі – можливо, будуть швидко зняті, але принаймні зменшать початковий знос і тертя. У пісках виправдані дорогі карбідні вставки, бо вони суттєво збільшують міжремонтний пробіг.
- Для важких глинистих та чорноземів (середній або низький абразив, але можуть бути удари): краще підходять комбіновані та ударотривкі рішення. Наприклад, дифузійне зміцнення + наплавлення високохромним сплавом. Карбіди теж корисні, але бажано в матриці (щоб не було суцільної крихкої фази). Тут можна зекономити і обмежитись термообробкою та наплавленням, без ультрадорогих пластин, бо виграш від них буде не такий разючий. Натомість дуже важливо, щоб деталь була міцною (не ламалась на твердих грудках) – тому високов’язка серцевина і контроль якості термообробки.
- Для кам’янистих ґрунтів (наявність гравію, уламків порід): критична ударна стійкість. Надтверді покриття ризикують відколотися, тому ставка – на пружні сталі, можливо, навіть ненадто високої твердості (45 HRC замість 55, якщо це збереже від тріщини). Можливе застосування ресорних сталей (типу 60С2А) з особливим профілем леза, яке само підточується. Якщо покриття – то тонкі, що не створюють локалізованих концентраторів напружень (наприклад, нітридування – воно навіть корисне, бо підвищує втомну міцність поверхні). Наплавлення доцільно робити дрібно-візерункове (щоб між твердішими точками був проміжок із м’якшого металу, який гасить удар). З вставок краще

застосовувати дрібні тверді зерна в матриці (так зване дробове наплавлення карбідом), ніж великі пластини.

- За великої вологості, хімічно агресивних ґрунтів (солонці): корозійно-механічний знос може стати значним. Тут вигідні нержавіючі покриття: нікелеві, хромові, або композити з неорганічною матрицею (наприклад, полімер + кераміка). Відомо, що карбід вольфраму хімічно дуже стійкий, а от швидкорізальна сталь може активно іржавіти. Тому у вологому середовищі карбідні деталі мають ще одну перевагу – вони не піддаються корозії. Також гарно працюють плакування нержавіючими сплавами (наприклад, напилення сплаву на основі нікелю) – це зменшує іржавіння в перервах між роботами.

Підтримання профілю та гостроти. Крім просто величини зносу, важливо, як метод впливає на форму деталі під час зношування. Наприклад, якщо крайка стає хвилястою (як у випадку переривчастої наплавки), це може бути плюсом для рихлення, але забагато хвиль – і погіршиться рівномірність різання. Тверді вставки часто призводять до того, що навколо них м’якший метал вибирається і утворюються виступи. Інколи це бажано (самозагострення), а інколи ні (починається “ребриста” поверхня, що створює нерівномірне навантаження). Тому конструкторам доводиться оптимізувати розміщення зміцнюючих елементів. Приклад – лапа Horsch з нижньою підрізкою: в ній передбачені зубці з твердого сплаву під час лиття, так що при зносі утворюється пилка, яка ріже коріння бур’янів краще. Іншими словами, ефективність методу – не лише у матеріалі, а й у геометрії. Той самий сплав, наплавлений суцільним шаром чи точково, дасть різний характер зношування. І це вибирають залежно від функції органу.

На завершення, складімо умовну таблицю (словесно) ефективності:

- Без зміцнення (просто сталь 45 HRC) – базовий ресурс, 100%.
- Гарт + відпуск – ресурс ~120–150% базового (в 1.2–1.5 раза більше).

- Нітроцементація/азотування – ресурс ~150–180% базового (залежно від товщини шару і умов; добре при малих навантаженнях).
- Наплавлення високохромним сплавом – ресурс 200–300% (2–3 рази більше), особливо якщо абразивний знос домінує.
- Наплавлення + вставки WC (композит) – ресурс 400–500% (4–5 разів), але ризик відколу при ударах.
- Повний твердий сплав (наприклад, напайний наконечник із WC-Co) – ресурс 500–1000% (5–10 разів) у чистому абразиві; при ударах може ламатися і втрачати ефективність.
- Керамічне покриття – потенційно дуже високий опір стиранню, але якщо швидко стреться або тріскне – ефект нівелюється (важко виразити у %; лабораторно Al_2O_3 покриття зменшило знос плуга майже на 90%, але практично буває менше).
- Лазерне наплавлення Stellite-6+WC – +300–400% до ресурсу (за даними полігонних випробувань)
- Комбіновані (гарт + наплавлення + карбіди) – можуть давати максимальний ефект до 10 разів ресурсу і вище, але й коштують відповідно.

Зважаючи на це, вибір методу – це оптимізація: для помірних умов достатньо гарту чи борування; для важких – наплавлення; для екстремальних – наплавлення з карбідами або вставки; для високих швидкостей (де перегрів і тертя) – твердоплівкові покриття (щоб зменшити тертя, уникнути перегріву крайки).

Нарешті, варто зазначити, що надійність реалізації теж важлива. Якщо технологія виконана неякісно (погана адгезія покриття, тріщини після гарту, пори в наплавленні), то очікуваного покращення може не бути. Тому виробники прагнуть стандартизувати процеси. Наприклад, порошкове напилення і лазерне оплавлення контролюються комп’ютером для стабільності результату. Це підвищує впевненість, що покращена деталь справді прослужить довше прогнозовано, а не зламається раніше через приховані дефекти.

Висновок до розділу.

Сучасні методи підвищення зносостійкості здатні суттєво, у кілька разів, збільшити довговічність робочих органів ґрунтообробних машин. Найкращий підхід – комбінувати декілька методів, враховуючи умови роботи. У пісках і сухому абразиві найбільш ефективні надтверді матеріали (карбіди, бориди); у кам’янистих і вологих ґрунтах – міцні наплавлення і дифузійні зміцнення, що не створюють крихких фаз. Провідні виробники, такі як John Deere, Lemken, Kuhn, Horsch, вже використовують ці методи на практиці, підтверджуючи їх ефективність статистикою зменшення зносу в 2–5 разів. Вітчизняна техніка також поступово впроваджує наплавлення, термообробку і нові матеріали, що дозволяє українським господарствам знижувати витрати і підтримувати високу продуктивність машин. Зважаючи на економічний ефект (значне скорочення простоїв та витрат на запасні частини), можна очікувати, що технології підвищення зносостійкості й надалі будуть розвиватися і стануть невід’ємною частиною проєктування ґрунтообробної техніки нового покоління.

РОЗДІЛ 2
МЕХАНІЧНА ПОВЕДІНКА СТАЛЕЙ ПІСЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ТА МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Особливості впливу термічної обробки на механічні властивості сталей

Серед сучасних режимів термічної обробки особливе місце посідає Q&P-обробка (quenching and partitioning), яка орієнтована на формування в сталях високої пластичності та ударної в'язкості за рахунок реалізації TRIP-ефекту (TRIP – transformation induced plasticity, тобто пластичність, зумовлена фазовим перетворенням). Її важливою перевагою є можливість застосування до відносно недорогих низьколегованих сталей, що робить процес привабливим для масового промислового впровадження.

Зазвичай Q&P-обробку використовують для низько- та середньовуглецевих сталей із вмістом вуглецю приблизно 0,10–0,45 % C, які додатково леговані марганцем у кількості 1,5–3,0 % Mn, можуть містити до 0,5 % Cr, 0,006–1,0 % Al та 1,5–2,5 % Si. Саме така комбінація елементів забезпечує необхідну стабільність аустеніту та здатність до формування бажаної мартенситно-аустенітної структури. Для високовуглецевих сталей даний режим застосовують значно рідше, оскільки надлишковий вміст вуглецю ускладнює досягнення оптимального поєднання міцності й пластичності.

Сутність Q&P-обробки полягає не лише в одержанні структури, що складається з мартенситу та залишкового аустеніту, а й у можливості цілеспрямовано регулювати їхній об'ємний вміст. Це досягається за допомогою спеціально організованої послідовності трьох стадій термічної обробки (схема процесу наведена на рис. 2.1).

На першій стадії заготовку зі сталі нагрівають до температури, що перевищує критичну точку Ac_3 приблизно на 30–50 K, забезпечуючи повну

аустенітизацію металу. Після формування однорідного аустеніту переходять до другої стадії – власне операції загартування (Quenching). Для цього виріб занурюють у гаряче середовище (як правило, розплавлену сіль або олово), температуру якого встановлюють нижче за температуру початку мартенситного перетворення Ms, але вище за температуру його завершення Mf. У таких умовах частина аустеніту перетворюється на мартенсит, тоді як решта зберігається у вигляді залишкового аустеніту, що й формує двофазну структуру “мартенсит + γ-фаза”.

Третя стадія передбачає повторний нагрів сталі в гарячому середовищі до строго контрольованої температури, за якої швидкість дифузії вуглецю є достатньою для його інтенсивного перерозподілу (Partitioning) із перенасиченого мартенситу в залишковий аустеніт. У процесі такого «розподілу» вуглецю аустеніт стабілізується, а мартенсит частково втрачає надлишковий вуглець, що в підсумку забезпечує сприятливе поєднання високої міцності, підвищеної пластичності та ударної в’язкості обробленої сталі.

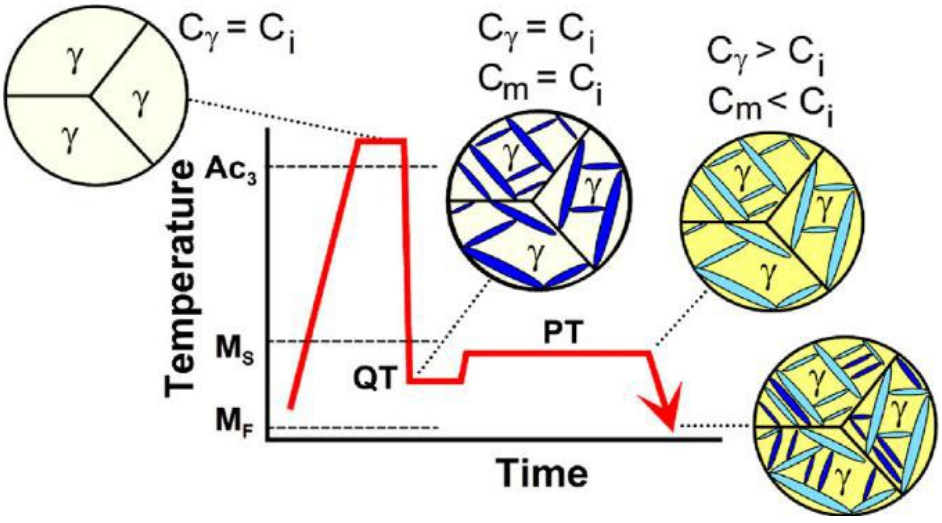


Рис. 2.1. Узагальнена схема технологічного циклу обробки «Q&P», спрямованої на формування мартенситної матриці з плівковими включеннями залишкового аустеніту. Позначення: Ci – концентрація вуглецю в початковому стані, Cγ – концентрація вуглецю у фазі аустеніту, Cm – концентрація вуглецю у мартенситі, QT – температура загартування, PT – температура стадії розподілу (дифузії) вуглецю.

У низці технологічних режимів температура стадії розподілу вуглецю може збігатися з температурою загартування. Тоді операцію витримки для дифузійного перерозподілу вуглецю виконують безпосередньо на рівні температури загартування, що фактично зводить процес до двох основних етапів. Після завершення витримки охолодження здійснюють на повітрі. У результаті збагачення аустеніту вуглецем під час стадії розподілу підвищується його термодинамічна стійкість, і тому під час подальшого охолодження він не перетворюється повністю на мартенсит, а частково зберігається в структурі матеріалу. Застосування такого режиму дає змогу отримувати сталь із надзвичайно високими експлуатаційними характеристиками — границя міцності може сягати близько 2000 МПа, при цьому відносне подовження зберігається на рівні приблизно 25 %. У дослідженні [1] встановлено, що перехід вуглецю з мартенситу до тонких плівкових прошарків залишкового аустеніту може відбуватися як у процесі охолодження після мартенситного перетворення, так і під час ізотермічної витримки сталей, легованих відповідними елементами. У таких умовах концентрація вуглецю в залишковому аустеніті здатна досягати близько 1,04 %, тоді як його середній вміст у вихідній сталі становить лише близько 0,27 мас. %.

У дослідженні [1] встановлено, що вміст вуглецю в залишковому аустеніті після проведення відповідної термічної обробки може досягати приблизно 0,55–1,0 мас. %, тоді як загальний середній вміст вуглецю в сталі становив лише 0,27 мас. %. Інші результати, наведені в роботі [1], демонструють суттєвий контраст між фазами: концентрація вуглецю в тонких аустенітних плівках сягала близько 1,03 мас. %, тоді як у мартенситних пластинах вона не перевищувала 0,08 мас. %, при середньому вмісті вуглецю в матеріалі на рівні 0,2 мас. %.

Подібні відмінності підтверджуються й ранішими експериментальними даними: після відпуску мартенситу у сталі з 1,0 ат. % вуглецю було виявлено близько 1,9 ат. % різниці між концентрацією вуглецю в мартенситній матриці та

в тонких прошарках залишкового аустеніту. Це свідчить про ефективний перерозподіл вуглецю між фазами під час термічних циклів.

За умов, коли потрібно забезпечити ще вищі показники міцності та одночасно оптимізувати структуру сталі, рекомендовано використовувати вдосконалений варіант процесу — Q-P-T обробку (quenching–partitioning–tempering), тобто загартування із подальшим розподілом вуглецю та заключним відпуском [1].

Мартенситні сталі, які проходять термообробку за схемою Q–P–T, суттєво відрізняються від сталей, загартованих за класичним підходом Q&T, насамперед підвищеним вмістом стабілізованого залишкового аустеніту. Саме його наявність забезпечує помітно кращу пластичність матеріалу. Після завершення обробки Q–P–T у структурі зазвичай утримується близько 5 % залишкового аустеніту, що переважно зосереджений у формі надтонких прошарків між окремими рейками мартенситу. У цих міжрейкових просторах також формуються дисперсні карбіди та нанорозмірні карбонітриди, які відіграють важливу роль у зміцненні сталі.

Приріст міцності таких сталей здебільшого зумовлений дисперсійним механізмом зміцнення: під час відпуску у структурі рівномірно виділяються дрібні частинки карбідної та карбонітридної фази, які створюють ефективні перешкоди для руху дислокацій. Оскільки рейковий мартенсит сам по собі має обмежену ударну в’язкість, вирішальне значення для тріщиностійкості набуває кількість і просторовий розподіл залишкового аустеніту. Тонкі аустенітні прошарки завтовшки приблизно 10 нм, розташовані між мартенситними рейками, здатні трансформуватися під навантаженням (TRIP-ефект), поглинаючи значну частину енергії та стабілізуючи деформаційний процес. Це істотно покращує опір крихкому руйнуванню та поведінку матеріалу в реальних умовах експлуатації.

Під час відпуску мартенситна матриця породжує численні нанорозмірні карбіди, які визначають ефективність дисперсійного зміцнення. Для формування

таких карбідних наночастинок сталь має містити карбідоутворювальні елементи — зокрема ніобій, ванадій і молібден. Вони не лише сприяють утворенню високодисперсної карбідної фази, але й забезпечують суттєве подрібнення зеренної структури, тобто додаткове зміцнення завдяки зменшенню розмірів зерен. Вміст вуглецю у подібних сталях повинен бути обмежений (<0,5 мас. %), оскільки надлишкова кількість карбідів цементитного типу негативно впливає на в'язкість і збільшує ризик крихкого руйнування під час термообробки.

Окремий напрям термомеханічної обробки ґрунтується на деформації аустеніту в області його метастабільного стану — цей підхід називають аусформінгом. Процес передбачає пластичну деформацію сталі у межах температур від Ar_1 до Ms, після чого метал швидко охолоджують, запобігаючи формуванню бейніту та перліту. У вітчизняних джерелах цей метод також відомий як низькотемпературна термомеханічна обробка.

Переваги аусформінгу пов'язані з тим, що мартенсит, який утворюється під час загартування, «успадковує» дефекти та субструктурні елементи, що виникли у деформованому аустеніті. Як доведено експериментально, саме дислокаційні скупчення, субкордони та дрібнодисперсні карбіди відіграють провідну роль у зміцненні, тоді як вплив подрібнення зерен є вторинним. Отже, підвищення міцності після аусформінгу зумовлене взаємодією двох механізмів: пластичної деформації метастабільного аустеніту та подальшого мартенситного перетворення, що «фіксує» сформовану субструктуру.

Ефективність аусформінгу визначають два ключові параметри — температура деформації та її ступінь. Гаряча деформація змінює не лише дефектний стан аустеніту, але й механізм росту мартенситу. Пластинчаста форма мартенситу майже не реагує на попередню пластичну деформацію, тоді як утворення рейкового мартенситу може бути істотно ускладнене через стабілізацію аустеніту при деформаціях понад 20 %. Відмінності пояснюються тим, що дислокаційна субструктура аустеніту по-різному впливає на рух меж росту мартенситних пластин і рейок.

На початковому етапі збільшення деформації спричиняє підвищення температури початку мартенситного перетворення Ms. Досягнувши певного критичного рівня, вона поступово знижується та надалі стабілізується. Така поведінка свідчить про складну рівновагу між дефектним станом аустеніту та термодинамічними умовами мартенситного перетворення.

Підвищення температури аусформінгу може викликати небажані структурні ефекти — зокрема формування грубозернистого або пластинчастого бейніту, що призводить до зменшення зміцнення. Натомість зниження температури сприяє формуванню дрібнозернистої структури та підвищує ефективність деформації у створенні високої густини дислокацій. Це позитивно впливає на ударну в’язкість і забезпечує кращу сукупність властивостей.

Зростаючий попит на високоміцні та водночас ударостійкі низьколеговані сталі стимулював активний розвиток різних варіацій аусформінгу. Одним із таких рішень є модифікований аусформінг, який передбачає гаряче прокатування у стабільній аустенітній області, подальше загартування до мартенситу та завершальний відпуск. Цю технологію застосовують для отримання підвищеної в’язкості та називають високотемпературною термомеханічною обробкою, щоб відрізнити її від класичного режиму деформації метастабільного аустеніту.

2.2. Методика проведення експериментальних досліджень

Для визначення зносостійкості досліджуваних сталей застосовували метод абразивного зношування, що ґрунтується на терті зразка об абразивні частинки, які не мають жорсткого фіксування в зоні контакту [4]. Такий підхід дозволяє моделювати умови, максимально наближені до реальних процесів роботи робочих органів, що зазнають інтенсивного абразивного впливу.

Згідно з вимогами ДСТУ, у ролі абразивного середовища використовували білий електрокорунд марки 25А (шліфзерно) фракції 0,212–0,425 мм (F60). Цей

абразив виготовляють із синтетичного корунду з вмістом оксиду алюмінію (Al_2O_3) до 99 %, що відповідає твердості 9 за шкалою Мооса. Корунд є дев'ятим еталонним мінералом у мінералогічній шкалі твердості, поступаючись лише алмазу, що забезпечує високу абразивну здатність матеріалу [3]. Еталонним зразком служила сталь 45 у стані постачання, твердість якої становила НВ = 200. Для порівняння прийнято її відносну зносостійкість ε_ет = 1, що дозволяє оцінювати зносостійкість інших сталей у відносних величинах.

Під час випробувань досліджуваний зразок встановлювали у спеціальний тримач і за допомогою важільного механізму притискали до поверхні гумового ролика із навантаженням 44,1 ± 0,25 Н. Абразив подавався з дозувального пристрою безперервно; потрапляючи в зону контакту, частинки впроваджувалися у поверхневий шар обертового гумового ролика. У процесі прокатування вони переміщувалися через контактну зону, створюючи інтенсивний абразивний вплив на поверхню випробуваного матеріалу та спричиняючи його зношування [4].

Дозувальний механізм забезпечував стабільне та безперервне надходження абразиву, що дозволяло підтримувати однакові умови навантаження протягом усього циклу випробувань, а отже — гарантувало відтворюваність результатів.

Тривалість проведення випробувань встановлюють залежно від твердості досліджуваного матеріалу, а необхідна тривалість контакту забезпечується вибраною кількістю обертів ролика відповідно до рекомендацій (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Рекомендовані значення числа обертів ролика для зразків різної твердості

Твердість дослідних зразків, HV	Величинаобертів ролика, хв $^{-1}$
До 400	600
400…800	1800
Понад 800	3600

Перед початком досліджень твердість кожного зразка визначалася за методом Віккерса [2]. Після вимірювань поверхню зразків очищували, промивали та висушували, а масу кожного з них визначали на аналітичних

терезах «ВЛ-224» із точністю до 0,001 г.

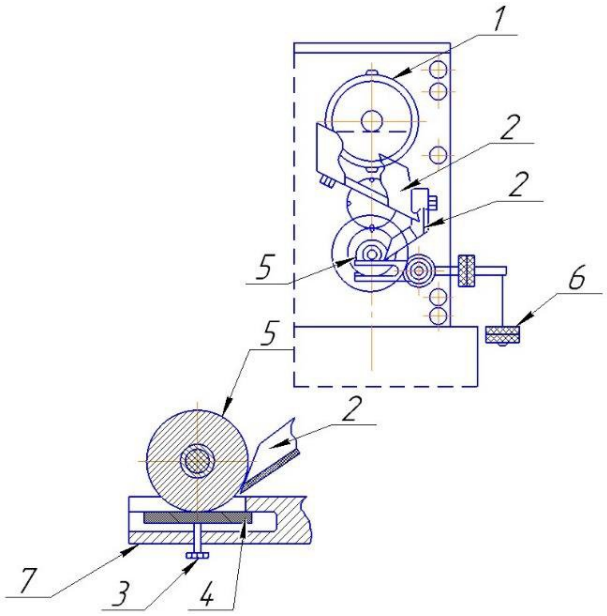


Рис. 2.2. Загальна компоновочна схема: 1 – корпус барабана; 2 – направляючий жолоб; 3 – регулювальний гвинт; 4 – досліджуваний зразок; 5 – гумовий ролик; 6 – вантажний елемент; 7 – утримувальний пристрій.

Для порівняння зносостійкості різних сталей використовували показник відносної зносостійкості. Він розраховується як відношення масового зносу еталонного зразка до масового зносу досліджуваного матеріалу з урахуванням різниці в їхній густині, що дає змогу коректно порівнювати матеріали з різною структурою та складом.

Корозійну стійкість випробуваних зразків оцінювали за допомогою методу прискорених корозійних випробувань, який виконували відповідно до вимог чинного стандарту ДСТУ [5].

Обраний метод базується на штучному прискоренні корозійних процесів шляхом збільшення вологості повітря та температури за відсутності краплинної вологи на поверхні зразків. Такий режим дає змогу інтенсифікувати перебіг корозії та скоротити тривалість експерименту.

Для досліджень застосовували плоскі пластинчасті зразки розміром 50×50×1,5 мм. З метою забезпечення достатньої статистичної достовірності випробувань у кожній серії використовували три однакові зразки [2].

Корозійні випробування виконували в камері соляного (морського) туману типу КСТ-18/001 (рис. 2.3), яка забезпечує стабільність заданих параметрів середовища та відтворюваність умов експерименту.

Рис. 2.3. Установка для створення соляного туману КСТ-18/001.

Програма випробувань експериментальних зразків на круговому ґрунтовому стенді передбачала виконання таких етапів: визначення маси зразків; вимірювання їхніх лінійних параметрів; характеристику ґрунтового середовища, зокрема його вологості та ущільнення після проходження котків; а також подальше опрацювання отриманих даних і аналіз результатів випробувань.

Рис. 2.4. Загальний вигляд кругового стенда для ґрунтових випробувань.

У якості об’єктів дослідження використовували зразки низьколегованих сталей, а також еталонний зразок, наведений на рис. 2.5.

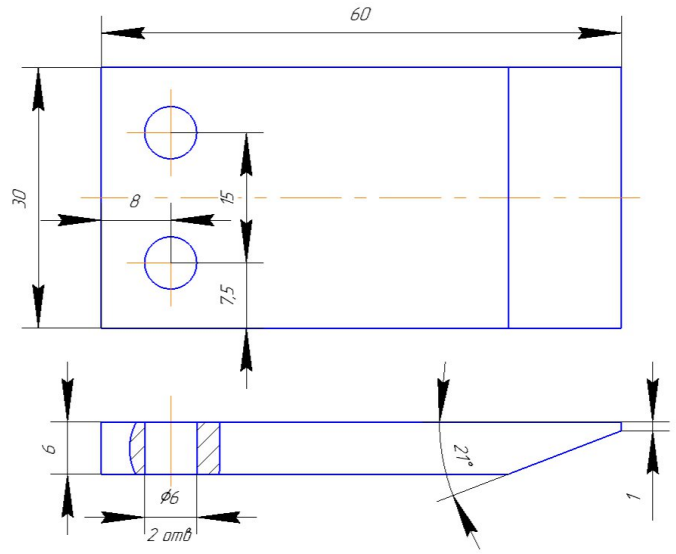


Рис. 2.5. Конструкторське зображення моделі лезового робочого органа для ґрунторізання.

Перед запуском стенда проводили попереднє визначення твердості моделей ґрунторізальних елементів. Вимірювання виконували на твердомірі МЕТОЛАБ 421 за методом Віккерса відповідно до вимог ДСТУ [2].

Перед запуском стенда та після кожного 8-годинного циклу його роботи виконували контроль маси випробуваних моделей ґрунтообробних робочих органів. Зважування проводили на аналітичних вагах AND HR-150AZG з високою точністю, що дозволяло визначити знос за показником втрати маси.

Додатково після кожного циклу здійснювали вимірювання геометричних параметрів зразків для оцінювання лінійного зносу, що відображає зміну розмірів під дією абразивного середовища.

Усі початкові, проміжні та кінцеві результати — як масові, так і лінійні — систематично фіксували у відповідній таблиці, що забезпечувало можливість повного аналізу процесу зношування та порівняння досліджуваних зразків.

Під час проведення випробувань на круговому ґрунтовому стенді здійснювався постійний контроль основних робочих параметрів, зокрема:

- зразок встановлювали під кутом 30° відносно поверхні дна;

- робоча глибина заглиблення становила 15 см;
- показник вологості ґрунту підтримували на рівні 6–7 %;
- швидкість руху робочого органа дорівнювала 1,9 м/с;
- кожні 4 години проводили вимірювання вологості ґрунту та, у разі відхилення, регулювали її до необхідного діапазону 6–7 %;
- після кожного 8-годинного інтервалу здійснювали вимірювання параметрів зразків та перемішування ґрунтової маси;
- після 16 годин роботи стенда замінювали половину ґрунту (50 % об’єму);
- після 32 годин експлуатації проводили повну заміну ґрунту (100 %);
- за результатами всього циклу випробувань оформлювали акт або офіційний протокол.

Польові (натурні) дослідження проводили на прикладі роботи стрілчастих лап культиватора. Для цього дослідні лапи монтували на стрілчастий навісний культиватор КОН-2,8 (рис. 2.6), що має ширину захвату 2,8 м та комплектується 11 робочими органами. Агрегат може навішуватись як на триточкову систему, так і на триточковий трикутник.

Стрілчасті лапи універсального типу призначені для підрізання бур’янів і розпушування верхнього шару ґрунту. Конструктивно вони характеризуються шириною захвату в межах 220–385 мм, кутом розкриття лез 60–70° та кутом підйому 23–30°. Максимальна глибина, на якій забезпечується ефективна робота таких лап, може досягати 14 см.

Для проведення польових досліджень були виготовлені пластини розмірами 190 × 50 × 3 мм. Перед встановленням їх піддали термічній обробці за таким режимом: загартування від температури 900 °С та подальший відпуск при 280 °С протягом однієї години. Після термообробки поверхню пластин очистили від окалини методом піскоструминної обробки, після чого їх приварили до стандартної стрілчастої лапи культиватора КРН-220. На рис. 2.7 наведено вигляд

серійної лапи КРН-220 із привареними випробувальними пластинами перед початком експерименту.

Рис. 2.6. Загальний вигляд культиватора КОН-2,8.

Рис. 2.7. Дослідна лапа культиватора КРН-220 після виготовлення.

За тією ж технологічною схемою були підготовлені й закріплені на стандартних стрілчастих лапах пластини зі сталей 30ХГСА та 55С2, що широко використовуються у сільськогосподарському машинобудуванні. У межах даного дослідження ці матеріали застосовували як порівняльні аналоги.

Оцінювання зносостійкості здійснювали шляхом визначення маси лап із привареними пластинами до початку та після завершення польових випробувань. Отриманий знос характеризували як втрату маси робочого органа під дією

експлуатаційного навантаження. Для комплексного аналізу також визначали знос стандартної лапи зі сталі 30 без додаткових накладок, що дозволило порівняти ефективність використаних матеріалів.

РОЗДІЛ 3
АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО ВИРОБНИЦТВА ДОВГОВІЧНИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИН

3.1. Аналіз результатів дослідження експлуатаційних властивостей сталей

Загальновідомо, що підвищення твердості матеріалу за умов абразивного зношування здебільшого сприяє зменшенню інтенсивності втрати маси. Проте твердість не може розглядатися як єдиний або абсолютно надійний критерій зносостійкості. Вирішальний вплив на опір зношуванню мають хімічний склад сталі, наявність легувальних елементів і характер проведеної термічної обробки, оскільки саме вони формують комплекс механічних і структурних властивостей матеріалу.

Експериментальні дані, подані у вигляді графічної залежності (рис. 3.1), свідчать, що для термічно зміцнених легованих сталей характерна чітко виражена обернена залежність між твердістю та інтенсивністю зношування. Із зростанням твердості досліджуваних сталей швидкість абразивного руйнування помітно зменшується, що підтверджує ефективність обраних режимів термообробки для підвищення експлуатаційної довговічності.

Результати випробувань на круговому ґрунтовому стенді, що відображають зміну величини зносу робочих органів залежно від напрацювання, подано в таблиці 3.1 та на рисунках 3.2–3.5.

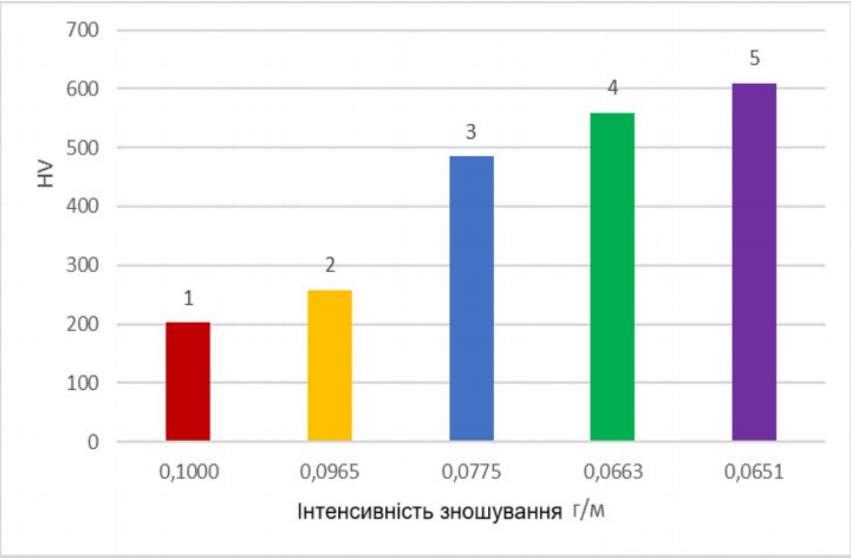


Рис. 3.1. Зміна інтенсивності зношування залежно від твердості для п’яти типів сталей: 1 – конструкційна сталь 45; 2 – пружинна сталь 65Г; 3 – модифікований низьколегований сплав (0,33C–1,86Si–1,44Mn–0,59Cr); 4 – комплекснолегований сплав (0,35C–1,77Si–1,35Mn–0,58Cr–0,20Mo–0,04Nb–0,031Ti); 5 – високолегований сплав (0,44C–1,60Si–0,01Mn–1,2Cr–0,95Mo–0,08V–0,05Nb–0,05Ti).

Таблиця 3.1 – Показники втрати маси досліджуваних сталей після 160 годин експлуатаційних випробувань

№	Зразки	Твердість, HV	Маса до випробовування, г	Знос, г
1	Сталь 45	211,4	70,9682	26,3572
2	Сталь 65Г	459	69,4751	23,8993
3	30ХГСА	329,8	60,3911	29,8549
4	0,35C-1,77Si-1,35Mn-0,58Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,031Ti	556,9	65,5981	16,8221
5	0,33C-1,86Si-1,44Mn-0,59Cr	473	69,8371	18,4749
6	0,44C-1,60Si-0,01Mn-1,2Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb- 0,05Ti	566	69,5251	18,5471

Отримані результати свідчать, що сталь складу 0,35C–1,77Si–1,35Mn–0,58Cr–0,20Mo–0,04Nb–0,031Ti після термообробки (загартування при 900 °C та відпуск при 280 °C протягом однієї години) демонструє підвищення зносостійкості майже у 1,9 раза порівняно зі сталлю 45.

а) б)

в) г)

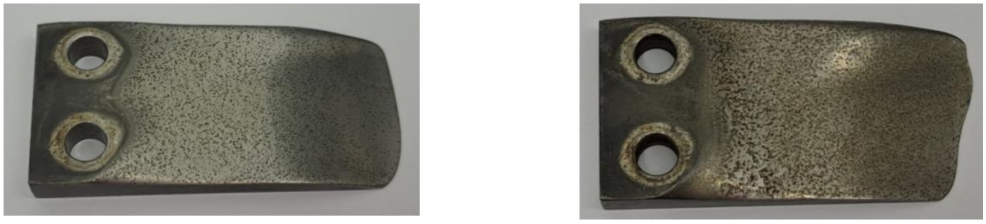


Рис. 3.2. Зміни поверхні зразка зі сталі 45 під час випробувань на зношування: а) після 40 годин роботи; б) після 80 годин; в) після 120 годин; г) після 160 годин.

а) б)

в) г)

Рис. 3.3. Зміна стану поверхні сталі 0,35C–1,77Si–1,35Mn–0,58Cr–0,20Mo–0,04Nb–0,031Ti після різних періодів експлуатаційних випробувань: а – 40 год; б – 80 год; в – 120 год; г – 160 год.

Після проведення термічної обробки – загартування при 900 °C та подальшого відпуску при 280 °C протягом однієї години – сталь складу 0,44C–1,60Si–0,01Mn–1,2Cr–0,95Mo–0,08V–0,05Nb–0,05Ti продемонструвала зносостійкість, яка перевищує показники еталонної сталі 45 приблизно у 1,7 рази.

а) б)

в) г)

Рис. 3.4. Динаміка зношування сталі 0,44C–1,60Si–0,01Mn–1,2Cr–0,95Mo–0,08V–0,05Nb–0,05Ti: а) після 40 годин роботи; б) після 80 годин; в) після 120 годин; г) після 160 годин випробувань.

Після термічної обробки — загартування при 900 °C із подальшим відпуском за температури 280 °C протягом однієї години — сталь складу 0,33C–1,86Si–1,44Mn–0,59Cr продемонструвала зносостійкість, що перевищує показник еталонної сталі 45 приблизно у 1,4 раза.

а) б)

в) г)

Рис. 3.5. Еволюція зношування сплаву 0,33C–1,86Si–1,44Mn–0,59Cr у процесі роботи: а) після 40 годин навантаження; б) після 80 годин; в) після 120 годин; г) після 160 годин випробувань.

Для верифікації лабораторних результатів щодо зносостійкості розроблених сталей було здійснено комплекс натурних випробувань у реальних умовах роботи агрегату. Під час польових досліджень виконували міжрядний обробіток ґрунту на ділянці площею 6,5 га, причому швидкість руху трактора становила 12 км/год, що відповідало типовому агротехнологічному режиму експлуатації.

Як матеріал для виготовлення дослідних накладок було обрано сталь складу 0,35C–1,77Si–1,35Mn–0,58Cr–0,20Mo–0,04Nb–0,031Ti. Із неї виготовили пластини розмірами 190 × 50 × 3 мм, які перед монтажем піддали термообробці за таким режимом: загартування при 900 °C з подальшим відпуском за температури 280 °C протягом однієї години.

Після завершення термічної обробки виготовлені пластини очистили від окалини шляхом піскоструминної обробки, а потім приварили до стандартної стрілчастої лапи культиватора КРН-220. На рис. 3.6 (а) представлено базовий варіант серійної лапи зі сталі 30, тоді як на рис. 3.6 (б) показано модифіковану лапу з привареними експериментальними пластинами перед початком випробувань.

За тією самою методикою були виготовлені та закріплені аналогічні пластини зі сталей 30ХГСА та 55С2, які широко застосовують у сільськогосподарському машинобудуванні. У цьому дослідженні ці матеріали виконували роль порівняльних аналогів.

Оцінювання зносостійкості здійснювали шляхом визначення маси лап із привареними пластинами до та після завершення польових випробувань. Величину зносу трактували як втрату маси робочого органа під час його експлуатаційного навантаження. Для комплексної оцінки також вимірювали знос серійної лапи зі сталі 30 без додаткових накладок. На рис. 3.6 (а) подано зовнішній вигляд нової серійної лапи КРН-220, а на рис. 3.6 (б) — ту саму лапу після проходження випробувань із привареними дослідними пластинами. Систематизовані результати польових випробувань сталей різного складу та

їхніх режимів термообробки наведено у таблиці 3.2. Найвищу зносостійкість продемонструвала експериментальна сталь 0,35C–1,77Si–1,35Mn–0,58Cr–0,20Mo–0,04Nb–0,031Ti: її масові втрати становили лише 15,22 г після термообробки, що включала загартування при 900 °C та відпуск при 280 °C тривалістю 1 година.

Таблиця 3.2 – Показники результатів польових випробувань сталей та ефективності їх термічної обробки

№ п/п	Вид зразку	Відносна зносостійкість
1	30ХГСА, гартування при 880 °C в оливі, подальший відпуск при 550 °C протягом 1 год, охолодження у воді	0,88
2	Сталь 30ХГСА: загартована з температури 880 °C у масляному середовищі, після чого відпущена при 250 °C протягом однієї години; кінцеве охолодження виконано у воді	0,83
3	0, Сталь складу 0,35C–1,77Si–1,35Mn–0,58Cr–0,20Mo–0,04Nb–0,031Ti була загартована від 900 °C у водному середовищі та відпущена при 280 °C з витримкою 1 годину.	1,20
4	Сталь 55С2 була загартована з температури 880 °C у масляному середовищі, після чого відпущена при 400 °C; охолодження здійснено у воді.	0,61
5	Сталь 30	1,00

а) б)

Рис. 3.6. Культиваторна лапа КРН-220 перед початком випробувань: а – стандартне виконання; б – модифікований варіант із приварениими пластинами.

а) б)

Рис. 3.7. Стан лапи культиватора КРН-220 після польових випробувань: а – модифікована лапа з пластинами зі сталі 30ХГСА; б – лапа з пластинами зі сталі 0,35C–1,77Si–1,35Mn–0,58Cr–0,20Mo–0,04Nb–0,031Ti.

Отримані результати переконливо демонструють ефективність використання запропонованих сталей для виготовлення робочих органів сільськогосподарських машин.

3.2. Технологічні засади виготовлення робочих органів ґрунтообробних машин із підвищеним терміном служби

У межах виконання дослідження було здійснено серію виплавок у відкритій індукційній печі ІСТ-016 з основним футеруванням тигля та номінальною місткістю 50 кг. Специфіка індукційного плавлення полягає у відсутності можливості проведення повноцінних рафінувальних операцій (за винятком процесів розкиснення), тому для отримання металу високої чистоти було обрано технологію сплавлення високоякісних та особливо чистих шихтових матеріалів.

До складу шихти входили:

– залізо типу «Армко» з мінімальним умістом сірки та фосфору;

– металевий хром марки Х99;

– електролітичний марганець Мн998;

– електролітичний нікель Н1;

– металевий молібден МШВ;

– ніобій марки НБШ;

– кремній марки Кр00;

– феррованадій ФВд80.

Як розкислювальні компоненти застосовували алюміній А99, феробор ФБ20 та мішметал МЦ-50Ж6 у кількостях, необхідних для забезпечення приблизно 0,01 % алюмінію та церію у сплаві.

Перед проведенням плавки виконували точний розрахунок шихтового складу, результати якого фіксували у технологічній карті плавлення. Процес виплавки у печі ІСТ-016 наведено на рис. 3.8. Під час плавлення та подальшого розливання металу температура підтримувалася в інтервалі 1600–1610 °С, що забезпечувало рівномірність хімічного складу та належний ступінь однорідності розплаву.

Рис. 3.8. Процес виплавлення сталі у відкритій індукційній печі

Після завершення плавлення метал із відкритої індукційної печі зливали в розливний ківш, який попередньо нагрівали до температури близько 900 °С. Із ковша відбирали пробу розплаву для проведення хімічного аналізу, а потім розплавлений метал заливали у підготовлену «земляну» форму, оснащену прибутковою надставкою (рис. 3.9). Верхню частину прибутку засипали екзотермічною сумішшю, що забезпечувало винесення усадкової раковини в

прибуткову зону, збільшувало вихід придатного металу та підвищувало якість отриманих електродів.

У результаті розливання було отримано витратні електроди діаметром 75 мм і масою близько 54–55 кг разом із прибутковою частиною. Їх хімічний склад відповідав вимогам для подальшого електрошлакового переплавлення. Після завершення кристалізації та охолодження виливок електрод очищали від формувальної суміші, оглядали зовнішню поверхню, відрізали прибуткову частину, вирізали затравку для ЕШП, виконували необхідну зачистку поверхні та готували електроди до переплаву на установці електрошлакового переплаву.

Рис. 3.9. Формування електродів після відкритої індукційної виплавки.

Після проведення електрошлакового переплаву були отримані злитки, зовнішній вигляд яких наведено на рис. 3.10. Їхня поверхня рівна та однорідна, без ознак перетискань чи інших дефектів.

а)

б)

Рис. 3.10. Процес видалення оболонки («роздягання») злитків (а) та їх зовнішній вигляд після очищення (б).

Після повного охолодження електрошлаково переплавлені зливки масою до 40 кг готували до операції кування. Перед початком кування від кожного злитка відокремлювали нижню частину разом із затравкою (висота затравки становила приблизно 20 мм), а очищену основну частину передавали на подальшу обробку.

Злитки завантажували в попередньо прогріту піч (Т ≈ 800 °С), після чого нагрівали до температури близько 1180 °С та витримували за цієї температури протягом двох годин. Кування виконували у температурному діапазоні від 1180 °С до 900 °С, після чого заготовку повторно поміщали в піч для доведення температури.

Процес деформування здійснювали на ковальському молоті з масою падаючих частин 750 кг, використовуючи плоскі бойки.

Кування злитка до отримання сутунка необхідних розмірів — товщиною 65+4 мм, шириною 140+8 мм та максимально можливою довжиною — здійснювали в три проходи, поступово зменшуючи товщину до заданого значення.

Рис. 3.11. Процес різання злитка ЕШП.

Подальша обробка передбачала послідовність технологічних операцій, у результаті яких отримували високоміцний гарячекатаний лист:

Заготовку з низьковуглецевої сталі нагрівали в муфельній печі до температури деформації 1080 °С та витримували за цієї температури протягом однієї години.

Виконували прокатку в температурному інтервалі 1100–900 °С зі ступенем обтиснення 60 %, після чого матеріал охолоджували на повітрі.

Із отриманого листового прокату вирізали та зачищали пластини (рис. 3.12), які надалі призначалися для приварювання на ріжучі кромки робочих органів ґрунтообробних машин.

Рис. 3.12. Процес розкроювання заготовки (пластини).

Ключовим параметром режиму ручного дугового зварювання є сила зварювального струму. Із її зростанням збільшується довжина та ширина зварювальної ванни, а також глибина проплавлення основного металу. Під час вибору величини струму враховують товщину зварюваних деталей, діаметр електрода, тип і просторове положення шва, а також рід та полярність струму.

З’єднання низьколегованих сталей виконують електродами типу Е46 марки ОЗС-12 (рис. 3.13) та електродами типу LB-52U. Метал шва, отриманий за їх використання, характеризується високою ударною в’язкістю та підвищеною стійкістю до утворення тріщин.

Після виконання зварювання шов очищують і проводять контроль його якості, перевіряючи наявність можливих дефектів, таких як підрізи, раковини, непровар та інші порушення структури.

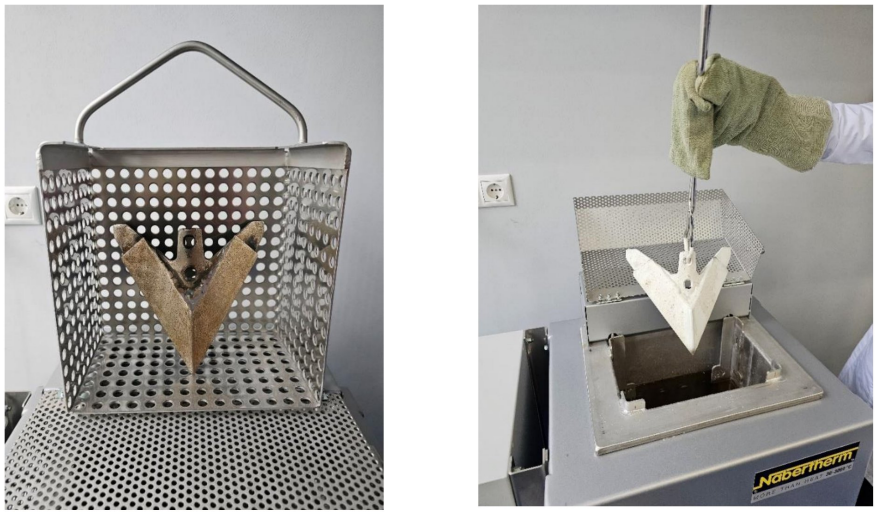
Для зняття внутрішніх напружень у готовому виробі застосовують відпал із подальшою термічною обробкою, що виконується за такими режимами:

Відпал за температури 900 °С;

Загартування, яке включає аустенізацію при 900 °С з витримкою протягом 300 секунд, після чого виріб охолоджують у гарячому середовищі — соляному розплаві — за температури 220 °С протягом 30 секунд;

Рис. 3.13. Процес приварювання пластин із низьколегованої сталі.

Відпуск (розподіл) за температури 350 °С із витримкою протягом 60 секунд у соляному розплаві, після чого деталь охолоджують на повітрі.



а) б)

Рис. 3.14. Етапи термічної обробки виготовленої лапи культиватора: а) стан деталі до проведення термообробки; б) вигляд деталі після виконання термообробки.

Розроблені лапи культиватора після досягнення граничного зносу можуть бути відновлені шляхом заміни зношених елементів — нових різально-лезвійних частин, які виготовляють окремо та приварюють унапуск замість видалених

пошкоджених фрагментів. Такий підхід забезпечує можливість щонайменше дворазового відновлення ресурсу лап, що дозволяє сільськогосподарським виробникам істотно зменшити витрати на придбання нових, дорогих робочих органів.

Висновки по розділу

Лабораторні дослідження відносної зносостійкості експериментальних сталей, що пройшли термічну обробку за режимом гартування при 900 °С з подальшим відпуском при 280 °С, засвідчили середній рівень зносостійкості, який перевищує показники сталі 65Г більш ніж на 27 %.

Стендові лабораторні випробування з використанням аналогічного режиму термообробки показали ще вищий результат — зносостійкість дослідних сталей перевищила показники сталі 65Г у середньому більш ніж на 30 %. Отримані дані демонструють високу відтворюваність і достовірність результатів.

Польові (натурні) випробування низьколегованої сталі марки 0,35C–1,77Si–1,35Mn–0,58Cr–0,20Mo–0,04Nb–0,031Ti показали дворазове збільшення її ресурсу порівняно зі стандартними аналогами. Такий результат підтверджує доцільність застосування розроблених сталей для виготовлення робочих органів сільськогосподарських машин.

У ході виконаних досліджень була розроблена технологія підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин шляхом приварювання до них зносостійких пластин із низьколегованої сталі. Реалізація технології можлива як у стаціонарних умовах на підприємствах, так і у майстернях невеликої потужності.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У межах кваліфікаційної роботи вирішено важливу науково-технічну проблему, що полягає у суттєвому підвищенні довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробної техніки шляхом обґрунтованого добору хімічного складу сталей і оптимізації режимів їх термічної обробки.

У результаті проведених досліджень сформовано два ефективні варіанти термічної обробки для розроблених низьколегованих сталей, які передбачають:

- гарячепластичну деформацію при 1000 °C, гартування за 900 °C із подальшим відпусканням при 280 °C;
- гарячу прокатку за 1000 °C, інтенсивне гартування при 210 °C з витримкою 100 с та наступний розподіл за температури 350 °C тривалістю 1000 с.

Створено технологічний підхід до підсилення робочих органів, який передбачає кріплення на ділянках максимального зносу спеціальних зносостійких накладок. Ресурс цих пластин перевищує тривалість роботи стандартних деталей приблизно у 1,5 раза.

Натурні випробування підтвердили, що робочі органи, виготовлені зі сталі рекомендованого складу 0,35C–1,77Si–1,35Mn–0,58Cr–0,20Mo–0,04Nb–0,031Ti та експлуатовані в умовах супіщаних ґрунтів, демонструють підвищену зносостійкість – приблизно на 20 % у порівнянні з серійними аналогами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Rifai M. A., Abu-Zahra A. A., Alshrah H. Wear and coating of tillage tools: A review. Heliyon. 2023. Vol. 9, No. 11. P. e20235. URL: DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e20235.

2. Le Andersson D., Håkansson L. Wear on steel tillage tools: A review of material, soil and dynamic conditions. Soil & Tillage Research. 2024. Vol. 241. P. 105907. URL: DOI: 10.1016/j.still.2024.105907.

3. Li X., Li J., Li S., Zhang J. Research Progress on the Wear Resistance of Key Agricultural Machinery Components. Machines. 2023. Vol. 11, No. 12. P. 1204. URL: DOI: 10.3390/machines11121204.

4. Борак К. В. Вплив попередньої корозії на інтенсивність абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин. Наукові праці ВНТУ, 2023, № 2. [Електронний ресурс]. Режим доступу URL: https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/686/653/.

5. Koksal S., Ahlatci H. Effect of Boronizing on the Wear Resistance of Low-Alloy Steels Used in Agricultural Tools. Surface & Coatings Technology. 2019. Vol. 372. P. 174–183. URL: DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.05.028.

6. 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.

7. Zhang C., Wang Y., Liu X. Microstructure and Soil Wear Resistance of D517 Coating on Q235 Steel Substrate. Materials. 2021. Vol. 14, No. 21. P. 6518. URL: DOI: 10.3390/ma14216518.

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. Zhang Y., Sun L., Chen P. Wear Resistance Enhancement of Rotary Tillage Blades by Laser Cladding. Materials. 2024. Vol. 17, No. 21. P. 5006. URL: DOI: 10.3390/ma17215006.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. Borak, K. V., Kulykivskyi V. L. Borovskyi 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.

15. Lyytikäinen T., Peltonen M. Wear of Cultivator Sweeps in Soil – Effects of Material and Heat Treatment. Journal of Agricultural Engineering Research. 2020. Vol. 186. P. 35–44. URL: DOI: 10.1016/j.jaer.2020.02.004.

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

17. Bergström J., Olsson M. Abrasive wear resistance of thermally surfaced materials for soil tillage applications. Höganäs Technical Paper. 2013. 15 p. URL: https://www.hoganas.com/

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

19. Борак К.В., Куликівський В.Л., Кушим Р.В., Бистрицький Б.П. Особливості абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин. XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (01-17 жовтня 2025 р.). URL: http://animal-conf.inf.ua/conf.html.

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

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

22. Patel M. M., Sharma A., Singh R. K. A Comprehensive Review of Improving the Durability and Wear Resistance of Agricultural Machinery Components via Thermal Spraying Techniques. Coatings. 2025. Vol. 15, No. 6. P. 632. URL: DOI: 10.3390/coatings15060632.

23. Ajibola F., Kuitunen L., Kuokkala J. Improvement of Soil-Engaging Tool Durability by Hardfacing Techniques. Wear. 2022. Vol. 498–499. P. 204294. URL: DOI: 10.1016/j.wear.2022.204294.