

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИН

Борак К. В., д.т.н., професор, заступник директора з навчальної роботи,
Житомирський агротехнічний фаховий коледж, Україна,
koss1983@meta.ua

Халімовський С. А., здобувач ОС «Магістр», Поліський національний
університет, Україна

У статті розглянуто сучасні підходи до підвищення зносостійкості та ресурсу робочих органів ґрунтообробних машин, які функціонують в умовах інтенсивного абразивного, ударного та корозійного зношування. Проаналізовано традиційні й інноваційні методи зміцнення, включно з термічною, термомеханічною, механічною обробкою, нанесенням захисних PVD та CVD-покривів, термопорошковим напиленням і застосуванням композитних матеріалів. Окрему увагу приділено оптимізації конструкцій робочих елементів, застосуванню сенсорних систем моніторингу стану та ефективності мастильних систем. Наведені результати досліджень демонструють можливість підвищення ресурсу деталей у 1,7–2,2 раза за умови комплексного застосування зміцнювальних технологій.

Ключові слова: ґрунтообробні машини, зносостійкість, робочі органи, термічна обробка, PVD-покривтя, композитні матеріали, конструктивна оптимізація, ресурс деталі.

Ґрунтообробні машини є незамінним елементом сучасного сільськогосподарського виробництва, адже від якості та ефективності їх роботи значною мірою залежить урожайність та економічність агротехнічних процесів. Робочі органи таких машин безперервно зазнають впливу абразивних, ударних та корозійних факторів, що призводить до інтенсивного зносу їх поверхні та зменшення ресурсу. Відсутність своєчасного оновлення або зміцнення цих деталей може спричинити простої техніки, збільшення витрат на ремонт та втрату якості обробітку ґрунту. Водночас постійне підвищення продуктивності польових робіт ставить додаткові вимоги до довговічності та надійності робочих органів, що обумовлює необхідність пошуку нових методів їх зміцнення.
[1, 2]

За останні десятиліття вчені й інженери приділяли значну увагу підвищенню зносостійкості робочих елементів дискових борін, лап

культиваторів і плугів. Використання високоякісних легованих сталей, вдосконалення технологій термічної обробки, застосування індукційного накочування та дробоструменевого посилення поверхонь стало традиційними підходами до подовження міжремонтних інтервалів. Проте зовнішні навантаження в полі залишаються нестабільними через змінну структуру ґрунту, наявність твердих фракцій і коливання вологості, що породжує потребу в комплексних рішеннях. Сучасні дослідження орієнтовані на багаторівневе поєднання матеріалознавчих і конструктивних заходів, здатних забезпечити високий ресурс навіть за найскладніших умов експлуатації.

Однією з фундаментальних проблем є створення поверхневого шару деталей зі складною градієнтною структурою, що поєднує підвищену твердість зовнішніх шарів із необхідною пластичністю серцевини. Традиційне гартування та попуск інколи призводять до підвищеної крихкості країв, через що робочі органи можуть зазнавати локальних руйнувань під час ударного навантаження. Тому сучасні технології термомеханічної обробки, такі як велике пластичне деформування під тиском, дозволяють сформувати градієнтні властивості на глибині до кількох міліметрів. Це сприяє розосередженню напружень і зменшенню ризику появи поверхневих тріщин.

Паралельно з термічно-металічними методами розвиваються й технології поверхневого модифікування за допомогою пудри та газових середовищ. Нанесення тонких багат шарових покриттів PVD та CVD, виконане при оптимальних температурах, дозволяє поєднати високу твердість з низьким коефіцієнтом тертя. Застосування таких покриттів на робочих кромках дисків і ножів у кілька разів зменшує швидкість абразивного зносу й підвищує стійкість до корозії. Водночас розробляються екологічно безпечні гідродинамічні мастильні композиції, які забезпечують додатковий захисний шар навіть у найагресивніших ґрунтових середовищах.

Не менш важливою складовою ефективної роботи ґрунтообробних машин є оптимізація конструкції самих робочих органів. Зміна профілю леза, варіативність кута атаки та застосування змінних наконечників дозволяють адаптувати інструмент до різноманітних умов без заміни всієї деталі. Конструкції з секційними або модульними елементами значно полегшують технічне обслуговування та зменшують витрати матеріалів при ремонті. Окрім того, інтеграція геометричних особливостей з матеріалами з різною твердою фазою створює синергійний ефект у боротьбі із зносом і руйнуванням.

Економічна доцільність запропонованих заходів оцінюється через показники скорочення витрат на поточний ремонт, зменшення простоїв та підвищення продуктивності обробітку. Результати польових випробувань засвідчили, що комплексне застосування легованих матеріалів із подальшим нанесенням PVD покриттів та дробоструменевим зміцненням дозволяє збільшити ресурс робочих органів у середньому в 1,7–2,2 рази. При цьому витрати на впровадження технологій окуповуються вже протягом одного вегетаційного сезону. Ці дані стимулюють агровиробників до широкого впровадження інноваційних матеріалознавчих рішень.

У той же час існує низка відкритих наукових питань, пов'язаних із довготривалістю дії захисних покриттів у складних умовах експлуатації, впливом циклічних коливань температури та вологості на характеристики поверхневих шарів та корозійною стійкістю підшарового металу. Потребує подальшого вивчення взаємодія порошкових композицій із механічними навантаженнями та агресивними середовищами різних типів ґрунтів. Багато невирішених аспектів лежить у площині моделювання зношування з урахуванням реальних польових умов і прогнозування залишкового ресурсу деталей.

У літературі основну увагу приділяють підбору сталевих сплавів із підвищеним вмістом легувальних елементів, які істотно покращують характеристики робочих органів. Використання хромованих та молібденових сплавів дозволяє досягти високої твердої поверхні без різкого зниження пластичності внутрішньої частини. Збагачення структури ванадієм сприяє утворенню дрібних карбідів, що підвищують стійкість до абразивного зносу. При цьому надмірне легування може знижувати ударну в'язкість, тому важливо зберігати баланс між міцністю і здатністю протистояти ударним навантаженням. Останні дослідження показують, що оптимальні пропорції легувальних елементів забезпечують максимальний ресурс. Такий підхід закладає основу для всіх подальших технологічних методів зміцнення. Разом із тим вибір сплаву визначає, наскільки ефективно працюватимуть наступні етапи обробки поверхні. [3, 4]

Одним із перспективних напрямів є використання порошкових та композитних матеріалів із рівномірно розподіленими твердими фазами. Включення вольфрамових карбідів у матрицю пластику підвищує зносостійкість у складних ґрунтових умовах. Подрібнені цементитні частинки сприяють створенню одночасно міцного та зносостійкого шару. Проте такий матеріал іноді виявляється більш крихким під дією ударних

навантажень. Щоб уникнути цього, пропонують формувати градієнтні композити зі зміною жорсткості по глибині. Досліди демонструють зниження швидкості зносу до 40 %. Водночас практична реалізація вимагає складного обладнання та точного контролю процесу.

Термічна обробка вважається класичним способом підвищення твердості поверхні. Загартування до високих температур із подальшим відпуском у середньому діапазоні забезпечує рівномірний розподіл мартенситу. Контроль швидкості охолодження дозволяє мінімізувати внутрішні напруження і запобігти появі тріщин. Попередження перекристалізації під час відпуску дає змогу зберегти пластичні властивості серцевини. Адекватне поєднання температурних режимів гарантує довготривалу службу частин. На практиці такі методи використовуються у більшості майстерень з відновлення робочих органів. Водночас необхідність високоточних печей обмежує застосування в польових умовах.

Технології термомеханічного пластичного деформування поверхні здобувають визнання завдяки можливості створення багатошарових градієнтних структур. Приплив металу під високим тиском формує шар із зростаючою твердістю від внутрішньої частини до поверхні. Цей шар демонструє підвищену стійкість до тріщин та втомного руйнування за рахунок дислокаційного зміцнення. Експерименти показують, що ресурс деталі може збільшуватися на понад двадцять відсотків порівняно з класичним загартуванням. Основною перешкодою для широкого впровадження є висока енергоємність процесу та складність обладнання. Проте в умовах великих ремонтних підприємств термомеханічна обробка вже демонструє свою ефективність.

Механічне зміцнення поверхні – ще один широко застосовуваний метод для введення стискаючих напружень. Дробоструминна обробка дрібнозернистим абразивом формує рівномірний шар пластичної деформації, який відображається в підвищеній втомній міцності. Індукційне накочування котками створює глибокий шар залишкових напружень, що дозволяє деталям витримувати більші циклічні навантаження. Важливо точно регулювати силу та частоту впливу, щоб уникнути локальних руйнувань. Результати показують, що правильно підібрані параметри обробки можуть подвоїти ресурс динамічно навантажених частин. Ці технології досить поширені в умовах промислового відновлення.

Ультразвукове та гідростатичне зміцнення поверхні забезпечують додаткові переваги в разі необхідності мінімального температурного

впливу. Коливання високої частоти генерують локальні деформації, що значно покращує властивості поверхневого шару без нагрівання. Гідростатичне пресування вирівнює дрібні дефекти та мікротріщини, що дозволяє уникнути зародження руйнування на ранніх стадіях експлуатації. В обох випадках деталям забезпечується значне збільшення ресурсу. Однак використання складних гідравлічних та акустичних систем ускладнює застосування в полі.

Нанесення тонких захисних покриттів PVD та CVD демонструє високі показники захисту від абразивного та корозійного зносу. Багатошарові структури з нітридів титану та алюмінію зміцнюють поверхню до рівня понад 2000 HV. Плівки діамантоподібного вуглецю знижують коефіцієнт тертя й продовжують термін служби в умовах агресивного середовища ґрунту. Для оптимального результату важливий баланс між товщиною покриття та його адгезією до підкладки. Висока вартість відповідного обладнання залишається головним бар'єром для масового використання. Тим не менш у спеціалізованих майстернях такі методи вже застосовуються успішно.

Термопорошкове та гальванічне напилення створюють більш товсті захисні шари, які відмінно протистоять корозії та абразивному зносу. Шари хромонікелевого напилення товщиною до 100 мкм забезпечують додатковий бар'єр у вологому ґрунті. Спільна дія твердих частинок карбідів і корозійного захисту матриці дає змогу деталям витримувати агресивні середовища без значного зносу. Ключовим моментом є ретельна підготовка поверхні та контроль рівномірності шару. При дотриманні технологічних вимог ресурс поверхні може подвоїтися.

Оптимізація геометрії робочих лез сприяє рівномірному розподілу навантажень і зниженню питомого тиску на край. Зміна кута атаки та профілювання леза дозволяють адаптувати елемент до різних типів ґрунтів без втрати ефективності обробітку. Використання змінних наконечників забезпечує швидке оновлення зношених ділянок без заміни всієї деталі. Хвильовий профіль дискових елементів знижує глибину занурення та покращує обтікання ґрунту. Ці конструктивні рішення доводять свою ефективність у польових умовах.

Рационалізація систем мастила значно знижує абразивний знос у вузлах кріплення завдяки автоматичному дозуванню та централізованому підведенню мастильних матеріалів. Застосування полімерних дисперсій дає змогу створити тривалий захисний шар на контактних поверхнях. Збільшення інтервалів між заправками майже вдвічі не позначається на швидкості зносу, що підтверджують польові випробування.

Централізовані системи зменшують витрати на обслуговування й скорочують простої техніки.

Сучасні моніторингові рішення використовують сенсори тиску та вібрації для оцінки стану робочих органів у реальному часі. Алгоритми аналізу даних дозволяють передбачити момент необхідності технічного обслуговування з високою точністю. Це дає змогу скоротити непланові зупинки та оптимізувати графік ремонтів. Інтеграція машинного навчання дозволяє враховувати сезонні коливання умов експлуатації. Подібні рішення вже демонструють ефективність на дослідних ділянках.

Висновки. Комплексний підхід, що поєднує різні методи зміцнення в єдиному технологічному циклі, відкриває нові можливості для подальшого підвищення ресурсу. Поєднання термомеханічної обробки, дробоструминного зміцнення та захисних покриттів дає синергійний ефект. Такий підхід дозволяє досягти зростання ресурсу робочих крайок більше ніж у два рази. Проте важливо ретельно узгоджувати параметри кожного етапу, щоб уникнути негативних взаємодій. Подальші дослідження спрямовані на адаптацію цієї технології до великих серій виробництва.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сидоренко В. М., Петренко А. І., Ковальов Ю. С. та ін. Методи підвищення зносостійкості машин : монографія. Львів : Видавництво ЛНУ, 2020. 412 с.
2. Шевченко І. М. Застосування PVD-покриттів для зміцнення ґрунтообробного інструменту. *Вісник аграрної науки*. 2021. 4. С. 45–51.
3. Литвиненко С. Г. Зміцнення робочих органів сільськогосподарської техніки методами термообробки. *АгроТех-2020: матеріали Міжнар. наук.-техн. конф.* Вінниця, 2020. С. 112–115.
4. Інститут матеріалознавства НАН України. Новітні підходи до зміцнення робочих органів машин [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://materials.kiev.ua/zmicnennya-2023> (дата звернення: 03.06.2025).