

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

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

ХАЛІМОВСЬКИЙ СВЯТОСЛАВ АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 631.356.2:631.3.02:620.193

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ТА
ЗНОСОСТІЙКОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ
КАРТОПЛЕЗБИРАЛЬНИХ 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

_____ Халімовський С.А.

Керівник роботи

Грудовий Р.С.

кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Халімовський Святослав Анатолійович. Підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів картоплезбиральних машин. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

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

Проведений в магістерській роботі аналіз наявних наукових досліджень засвідчив, що надійність картоплезбиральних машин значною мірою залежить від інтенсивності зношування дискових копачів. Підвищення надійності роботи техніки досягається завдяки застосуванню нових конструкцій пасивних дисків із привареними ребрами жорсткості, що зменшують втрати бульб, а також використанню вібраційного зміцнення ріжучих крайок ножів, яке забезпечує підвищену зносостійкість.

Отримані в науковій роботі результати експлуатаційних досліджень результати в повністю узгоджуються з даними стендових тестів. Надійність дисків оцінювали за величиною напрацювання, що припадає на одиницю радіального зносу ріжучої крайки. Максимальний показник 86,2 га/мм продемонстрували диски, відновлені відповідно до розробленої технології. Найнижчий результат 43,8 га/мм отримано для дисків, відновлених приварюванням шин зі сталі 45 та вібродуговим наплавленням сплаву X12. Нові диски зі сталі 65Г мали показник 49,2 га/мм, що в 1,75 раза менше, ніж у дисків, відновлених за запропонованою технологічною схемою.

Запропонований вдосконалений варіант пасивного диска з ребрами жорсткості забезпечує підвищення відсотка викопуваності та зниження травмування бульб на 28%, що робить його ефективним засобом підвищення технологічної надійності картоплезбиральних машин.

Ключові слова: зносостійкість, надійність, довговічність, зміцнення, вібрація, картоплезбиральна машина, комбайн.

ANNOTATION

Khalimovskyi Sviatoslav Anatoliiovych. Increasing the Durability and Wear Resistance of Working Elements of Potato Harvesting Machines. – Qualification work on the rights of the manuscript.

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

The analysis of existing scientific studies conducted in the master's thesis has demonstrated that the reliability of potato harvesting machines largely depends on the wear intensity of the digging discs. Improving the operational reliability of the equipment is achieved through the application of new designs of passive discs fitted with welded stiffening ribs, which reduce tuber losses, as well as through the use of vibration strengthening of cutting edges, which provides enhanced wear resistance.

The results of the operational tests obtained in the research fully correspond to the data of the bench experiments. The reliability of the discs was evaluated by the amount of operating time per unit of radial wear of the cutting edge. The highest indicator 86.2 ha/mm was demonstrated by the discs restored using the developed technology. The lowest result 43.8 ha/mm was recorded for the discs restored by welding steel 45 strips followed by arc-vibration surfacing with X12 alloy. New discs made of 65Г steel had a value of 49.2 ha/mm, which is 1.75 times lower than that of the discs restored using the proposed technological method.

The proposed improved version of the passive disc with welded stiffening ribs ensures a 28% increase in the tuber extraction rate and a reduction in tuber damage, making it an effective means of enhancing the technological reliability of potato harvesting machines.

Keywords: wear resistance, reliability, durability, strengthening, vibration, potato harvesting machine, harvester.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	9
1.1. Аналіз конструкцій викопувальних робочих органів картоплезбиральних машин.....	9
1.2. Вібраційне зміцнення методом динамічного деформування.....	22
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	30
2.1. Обладнання та прилади.....	30
2.2. Установка для експериментального визначення зношування дискових копачів.....	33
2.3. Вивчення структурних характеристик та експлуатаційних властивостей.....	37
2.4. Методичний підхід до визначення надійності робочих органів.....	38
2.5. Режими стендових випробувань.....	39
Висновки по розділу.....	41
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	42
3.1. Вплив тривалості зміцнення на зміну параметрів дискового ножа.....	42
3.2. Оптимізація параметрів вібраційної обробки.....	46
3.3. Оцінювання структури матеріалу зразків.....	48
3.4. Дослідження експлуатаційної довговічності дисків копачів.....	49
3.5. Оцінювання надійності роботи дисків копачів картоплезбиральних машин.....	52
Висновки по розділу.....	54
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	57

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасний розвиток аграрного сектору України характеризується зростанням потреби у високопродуктивній та надійній техніці, здатній забезпечувати стабільний рівень урожайності та мінімізувати втрати під час збирання сільськогосподарських культур. Особливе місце серед технічних засобів займають картоплезбиральні машини, ефективність роботи яких значною мірою залежить від конструктивних параметрів та фізико-механічних властивостей їх робочих органів. Картопля є стратегічно важливою культурою для продовольчої безпеки країни, а тому підвищення ефективності її збирання напряду впливає на економічну стабільність агропідприємств.

У процесі експлуатації робочі органи картоплезбиральних машин – такі як лемеші, транспортери, просіювальні решітки, пальці грохотів, елеваторні елементи піддаються надзвичайно інтенсивному впливу абразивних частинок ґрунту, каміння, нерівностей рельєфу, підвищеної вологості та агресивних середовищ. Це призводить до активного зношування, втрати геометричної форми, зниження міцності й функціональності, що, у свою чергу, спричиняє зростання енергетичних витрат, підвищення частоти відмов і аварійних ситуацій. Нерідко робочі органи виходять з ладу ще до завершення сезону, що створює загрозу зриву технологічних строків збирання та збільшення прямих і непрямих збитків для аграріїв.

Зростання вартості металу, комплектуючих та імпортованих деталей, а також логістичних послуг у сучасних умовах веде до значного підвищення собівартості ремонту та технічного обслуговування картоплезбиральної техніки. Тому подовження ресурсу роботи комплектуючих стає одним із ключових факторів підвищення економічної ефективності виробництва. Особливої актуальності набуває впровадження новітніх технологій — таких як поверхневе зміцнення, термічне та хіміко-термічне оброблення, електроерозійне легування, плазмове та газотермічне напилення, застосування композиційних матеріалів, полімерних

покриттів, твердих сплавів та інноваційних сталей з підвищеною стійкістю до абразивного зносу.

Удосконалення робочих органів картоплезбиральних машин націлено не лише на продовження терміну служби деталей, а й на забезпечення стабільності технологічного процесу, зменшення втрат урожаю та підвищення якості збирання. Це важливо, оскільки зношені елементи здатні збільшувати відсоток механічних ушкоджень бульб, спричиняти додаткове засмічення картоплі ґрунтовими домішками, порушувати ритмічність технологічного процесу. Таким чином, модернізація робочих органів має комплексний ефект: підвищує продуктивність машин, забезпечує економію пального, зменшує навантаження на вузли та агрегати, а також сприяє екологічній стійкості виробництва шляхом скорочення кількості відходів металу та зменшення потреби у частій заміні деталей.

З наукової точки зору актуальність теми зумовлена необхідністю глибокого вивчення механізмів зношування, визначення їх домінуючих форм у різних умовах експлуатації, аналізу напружено-деформованого стану робочих органів та вибору оптимальних методів підвищення зносостійкості. Сучасні тенденції механіко-технологічного проектування вимагають застосування інженерних методів моделювання, матеріалознавчого аналізу та експериментальних досліджень. Поєднання цих підходів відкриває можливість створення нових конструктивних рішень, що підвищують ефективність роботи машин у складних польових умовах.

Отже, підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів картоплезбиральних машин є надзвичайно важливим завданням як з економічної, так і з технологічної та наукової точок зору. Дослідження у цьому напрямі спрямовані на оптимізацію конструкції, вибір інноваційних матеріалів і технологій зміцнення, що дозволить суттєво зменшити експлуатаційні витрати, підвищити надійність машин, мінімізувати втрати врожаю та забезпечити стабільний розвиток картоплярства в Україні.

Основною метою дослідження є підвищення експлуатаційної надійності робочих органів картоплезбиральних машин у процесі їх виготовлення та відновлення шляхом застосування технології вібраційного зміцнення.

Для реалізації поставленої мети передбачено виконання таких науково-технічних завдань:

- провести комплексний аналіз стану та оцінити рівень надійності робочих органів картоплезбиральних машин;
- розробити технологічний маршрут відновлення робочих органів картоплезбиральних машин, який забезпечує збільшення ресурсу їх роботи, та підготувати рекомендації до його промислового впровадження;
- створити конструктивно-технологічний варіант робочих органів з підвищеною надійністю на основі застосування вібраційного зміцнення.

Об'єктом дослідження є технологічні процеси підвищення надійності сільськогосподарської техніки..

Предметом дослідження закономірності підвищення надійності та обґрунтування параметрів виготовлення й відновлення дискових копачів картоплезбиральних машин.

Методи наукового дослідження. Методологічною основою виконання роботи є аналіз показників надійності картоплезбиральних машин в умовах експлуатації та вибір оптимальних методів і параметрів технологічних процесів, що забезпечують збільшення строку служби деталей при їх виготовленні та відновленні.

У дослідженнях застосовано:

- методи планування багатofакторного експерименту;
- сучасні комп'ютерні технології для опрацювання й інтерпретації результатів;
- статистичну обробку експериментальних даних;
- металографічні та механічні дослідження властивостей деталей, оброблених за різними технологіями.

Перелік **публікацій** за темою роботи:

1. Борак К. В. Халімовський С. А. Методи підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин. Synergetics, Fractals and New Technologies II International Scientific and Practical Conference, Zhytomyr, Ukraine, June 4-5, 2025. P. 48-53.

2. Куликівський В.Л., Бистрицький Б.П., Сенчило М.В., Халімовський С.А. Методи підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. 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. 243-250.

3. Байбула А., Халімовський С., Ковальчук Д. Триботехнічні процеси на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин. Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості: збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Кам'янець-Подільський, 16 жовтня 2025 року). Кам'янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. С. 55-63.

Практичну значущість мають: Теоретично та експериментально підтверджено доцільність застосування запропонованої технології виготовлення та відновлення робочих органів, оскільки вона забезпечує: підвищення якості викопування коренебульбоплодів; суттєве зниження їх пошкоджуваності; зростання зносостійкості та довговічності деталей.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 28 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 59 сторінок комп'ютерного тексту, містить 10 рисунків та 1 таблицю.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПРОБЛЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Аналіз конструкцій викопувальних робочих органів картоплезбиральних машин

Сучасне картоплярство потребує ефективних машин, здатних викопувати бульби з мінімальними втратами та пошкодженнями. Викопувальні (підкопувальні) робочі органи картоплезбиральних машин призначені для підрізання шару ґрунту на глибину залягання бульб і передачі цього шару разом з картоплею на сепарувальні пристрої. Від конструкції та роботи цих органів істотно залежать продуктивність збиральної техніки, рівень пошкодження врожаю та ефективність відокремлення землі. У цій статті проведено аналіз існуючих типів викопувальних робочих органів картоплезбиральних машин, розглянуто особливості конструкцій вітчизняних та зарубіжних моделей (Grimme, Anna, «Прем'єр» тощо), порівняно ефективність різних типів копальних елементів (лемішних, транспортерно-грохотних, дискових та ін.), а також окреслено тенденції розвитку цих конструкцій з урахуванням сучасних вимог до збереження врожаю, енергоефективності та зносостійкості [7].

Викопувальні робочі органи картоплезбиральних машин різняться за принципом дії і конструктивним виконанням. Загалом їх можна класифікувати за способом впливу на ґрунтовий пласт і бульби на пасивні, активні та комбіновані. Пасивні органи здійснюють підкопування без додаткових рухомих частин, активні – мають рухомі елементи для поліпшення процесу (вібрація, обертання тощо), комбіновані – поєднують пасивний леміш із допоміжними активними елементами (диски, валки тощо). За формою робочої поверхні підкопувачі бувають плоскі, коритоподібні (жолобчасті) та ін., а за конструкцією лемеша – суцільні чи розрізні (складені). Нижче розглянуто основні типи копальних органів та їх особливості [12].

Найпростішим типом є пасивні лемішні робочі органи, які за формою нагадують плуг або підгортач. Такий леміш підрізає пласт ґрунту під шаром залягання бульб і частково розкриває рядок, вивільняючи картоплю. Історично ці органи застосовувались у найпростіших копачах. Наприклад, кінна однорядкова копалка В-9 оснащена двобічним плужним лемешем, що підрізає рядок і відвалює його ґрунт з бульбами на два боки. У результаті бульби залишаються на поверхні поля для ручного збирання. Подібні пасивні лемеші відзначаються дуже простим і надійним устроєм, проте мають низку недоліків: вони беруть великий об'єм землі, не забезпечують її подрібнення, через що основне відокремлення ґрунту і бадилля доводиться виконувати вручну. Незважаючи на ці технологічні вади, пасивні лемішні підкопувачі є найпоширенішими завдяки простоті конструкції та низькій металоємності [4].

Суцільні плоскі лемеші використовувались у ранніх вітчизняних картоплекопачах, а розрізні (складені) – у деяких зарубіжних машинах. Зокрема, фірма Н. Sack (Німеччина) застосовувала роздільний двосекційний леміш, а англійська компанія Johnson – леміш Г-подібної форми з прорізом посередині. Коритоподібний (жолобчастий) леміш встановлено на однорядному комбайні Rekord (ФРН): він мав активні бічні стінки, опорний коток та допоміжні диски. Випробування показали, що завдяки активним боковинам і дискам такий леміш підкопує грядку без втрат бульб, не розвалює пласт по боках і не забивається навіть за наявності розвиненого бадилля. Цей приклад став основою для широкого впровадження комбінованих лемішів на сучасних машинах: до плоского пасивного лемеша додають копіювальні елементи (котки) та допоміжні диски з боків для розрізання гребеня. Така схема нині використовується більшістю закордонних виробників, зокрема в дворядних комбайнах AVR Spirit 4100/6200 (Бельгія) тощо [13].

Транспортерно-грохотні органи становлять собою поєднання підкопуючого лемеша і рухомого транспортерного полотна (елеватора), через яке просіюється ґрунт. Після підрізання пласта лемешем земля разом з

картоплею потрапляє на похилий транспортер із прутковим настилом, що здійснює грохочення – струшування грудок і просіювання ґрунту під час транспортування маси назад. За рахунок вібрації або спеціальних трясунів (ексцентрикових зірочок) транспортер ефективно руйнує грудки і очищує бульби від землі. Вітчизняним прикладом є дворядкова копалка ТЕК-2 (тракторний елеваторний копач), де основні робочі органи – трисекційний плоскорізальний леміш, головний і каскадний пруткові елеватори. Леміш підкопує одразу два рядки, а ґрунтово-картопляна маса послідовно проходить через головний елеватор (первинне просіювання) і каскадний елеватор, після чого бульби із залишками ґрунту та бадилля висипаються позаду машини у валок. Далі картоплю збирають вручну або підбирачем [7].



Рис. 1.1. Картоплезбиральний комбайн.

Подібний принцип реалізовано і в багатьох причіпних однорядних комбайнах. Наприклад, польські машини Anna Z-644 та Volko Z-643 оснащені активним лемешем і двома послідовними грохотними транспортерними стрічками, що дозволяють відсіяти землю і значно зменшити ручну працю. Такі копачі-валкоукладачі укладають викопані бульби на поверхню поля чи у міжряддя у вигляді валка, який потім може бути підібраний перевантажувачем

або комбайном. Транспортно-грохотні робочі органи суттєво підвищили продуктивність збирання, оскільки дозволяють за один прохід підкопати рядки і виконати основну сепарацію ґрунту. Недоліком їх є складніша конструкція (наявність рухомих транспортерів і приводу), більша маса машини та вимоги до акуратного регулювання швидкості стрічок, щоб не пошкоджувати бульби. Для зменшення травмування картоплі на сучасних елеваторах через кожний другий пруток ставлять гумові трубки або використовують прогумовані приводні колеса, що амортизують удари бульб об метал [20].

Окремий тип підкопувачів – дискові викопувальні органи (рис. 1.2), які використовують диски для підрізання пласту. Відомі приклади – дворядні комбайни Е665/Е660 та вітчизняний копач «Імпульс», де замість традиційного лемеша на кожний ряд встановлено по одному диску. Обертові диски діаметром ~500–600 мм заглиблюються в ґрунт під кутом і підрізають гребінь з обох сторін рядка. Існують різновиди таких дисків: вертикальні пруткові (спицеві) диски, суцільні плоскі диски або диски з зубчастим краєм трапецієподібної форми.

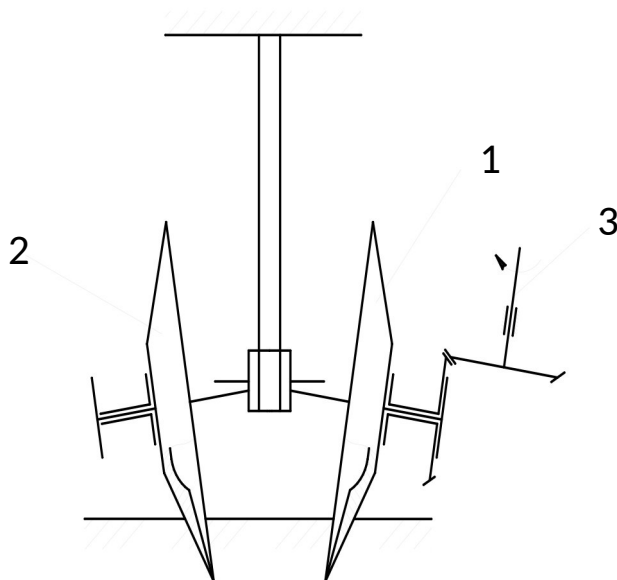


Рис. 1.2. Схема дискового копача.

Дискові копачі зазвичай також оснащуються напрямними щитками чи кожухами, які спрямовують підрізаний пласт на елеватор або убік від рядка. Обертові диски виконують роль активних ножів, розрізаючи ґрунт з меншим опором і частково руйнуючи пласт завдяки обертанню. Їх перевага – менший об'єм ґрунту, що виймається (адже кожен диск підрізає тільки з боків рядка), та плавніше проникнення у ґрунт. Однак застосування лише дисків без нижнього лемеша може призводити до пропуску окремих бульб, якщо вони лежать глибше між дисками. Тому часто диск комбінують із невеликим плоским лемешем в нижній зоні між дисками – така схема дозволяє підтримати пласт знизу і запобігти втратам бульб. Дискові робочі органи вимогливі до точного дотримання центру рядка: будь-яке відхилення трактора може призвести до неповного підкопування з одного боку. Для цього на сучасних машинах обов'язково встановлюють копіювальні котки-«діаболо», що прямують по гребеню і стабілізують напрям руху, а також слугують опорою для контролю глибини. Недоліками дискових підкопувачів є складніша конструкція (потрібні гідромотори чи передачі для приводу дисків, якщо вони активні) та можливе прослизання дисків відносно ґрунту, що погіршує якість роботи. Крім того, за наявності каміння існує ризик пошкодження дисків або застрягання каменів між диском і рамою.

Вібраційні підкопувачі оснащені лемешем, що здійснює коливальні рухи високої частоти. Ідея полягає в тому, що вібрація зменшує тертя лемеша об ґрунт і сприяє його кришенню, тим самим знижуючи тяговий опір і полегшуючи відділення землі від бульб. В лабораторних умовах і на дослідних зразках було показано, що коливний леміш може суттєво зменшити зусилля підкопування та покращити розпушення ґрунту. Проте промислового поширення такі органи не набули. Головна причина – необхідність створювати коливання великої маси металу, що призводить до значних динамічних навантажень на раму та підвіску копача. До того ж вібрація передається бульбам, збільшуючи їх ударне пошкодження. Таким чином, серійні картоплезбиральні комбайни відмовилися

від вібраційних підкопувачів на користь інших рішень. Нині дослідження у цьому напрямі тривають, зокрема з'являються експерименти з пружними (більш легкими) лемешами та біонічними формами, що зменшують опір без сильних коливань.

Валкові (роликові) робочі органи – це активні підкопувачі, що використовують обертові вали (ролики) для підйому ґрунтового пласта. Як правило, конструкція складається з двох паралельних валків – одного квадратного профілю і одного круглого – які обертаються вперед у напрямку руху машини. Валки захоплюють пласт ґрунту з бульбами: квадратний валик своїми гранями підриває і кришить ґрунт, а круглий підтримує пласт і передає далі на елеватор (рис. 2). Такий орган забезпечує додаткове розпушування ґрунту без значного збільшення тягового опору. В дослідних зразках активні валкові підкопувачі показали здатність зменшити грудкуватість і поліпшити виокремлення бадилля. Однак через складність синхронізації роботи двох валів і потенційну травматичність для бульб (між валками можливе затискання картоплин) цей тип не отримав масового застосування. Більше поширення набули пасивно-активні схеми з одним опорним котком та лемешем, що фактично виконують подібну функцію більш просто.

За десятиліття розвитку картоплезбиральної техніки сформувалися дві умовні школи конструювання – вітчизняна (радянська/українська) та зарубіжна (європейська, американська). Ранні радянські комбайни робили акцент на простоті і міцності, тоді як західні виробники поступово впроваджували більш складні системи для покращення очищення і збереження бульб. Розглянемо приклади.

Перші радянські комбайни, такі як ККУ-2А (дворядний комбінований картоплекомбайн, рис. 1.3.) та його модифікації, мали пасивні суцільні лемеші і систему елеваторів для сепарації. В них не було активних дисків чи складних очисних вузлів – землю відсіювали на пруткових конвеєрах, а остаточне відбирання домішок виконували люди на перебірковому столі чи вручну на полі.

Такий підхід вимагав більше ручної праці і працював добре переважно на легких ґрунтах або після попереднього підрізання бадилля. Українська промисловість у 1990-х роках випускала картоплезбиральні машини типу КСН-2Б або КТН-2В (виробництва Лідського заводу, Білорусь), що були навісними копачами-валкоукладачами. Копач КТН-2В оснащений пасивним двосекційним лемешем і двома послідовними грохотними елеваторами, які частково відсіюють землю і відкладають картоплю валком на поверхню. Таку техніку й дотепер використовують у фермерських господарствах України завдяки її невеликій вартості і пристосованості до тракторів малих класів тяги. Проте якість сепарації і рівень пошкодження бульб у цих машин гірші, ніж у сучасних західних аналогів. За даними досліджень, навісна копалка КТН-2В при роботі на швидкості $\sim 2,5$ км/год травмує близько 1,7% бульб, а кількість не піднятих з землі бульб може сягати 2%.



Рис. 1.3. Дворядний комбінований картоплекомбайн ККУ-2

В Україні ведуться також розробки удосконалених копачів. Одна з таких – комбінований агрегат «Прем'єр» (новітня вітчизняна модель, що отримала умовну назву), у конструкції якого реалізовано ряд покращень: встановлено активно-вібраційну решітку на початку елеватора, застосовано еластичний підресорений леміш, введено бокові диски для підрізання гребеня. Мета цих рішень – знизити втрати на вході і підвищити чистоту вороху без збільшення

пошкоджень бульб. Попередні випробування показали, що експериментальний копач із модернізованим робочим органом зменшив пошкоджені бульби з ~1,7% до ~1,4% порівняно з серійним зразком при тій самій швидкості. Технічні рішення захищені кількома патентами України, що свідчить про актуальність удосконалення саме пасивних лемішних органів.

Іноземні виробники картоплезбиральної техніки – *Grimme* (Німеччина), *DeWulf* (Бельгія), *AVR* (Бельгія), *Lockwood* (США), *Unia* (Польща) та інші – у повоєнні десятиліття інвестували в розвиток більш досконалих копальних систем. Уже в 1970-х роках багато європейських комбайнів мали комбіновані підкопуючі органи: плоский леміш підтримував пласт знизу, по боках рядка працювали дискові ножі (колтери) для відрізання ґрунту, а глибину контролювали спеціальні котки. Наприклад, у німецьких комбайнах *Grimme* серії SE застосовується двосекційний леміш повної ширини рядка та пара дискових колтерів з боків, а також гумові копіювальні котки-«*Diabolo*», що притискають гребінь і не дають машині заглибитися надміру. Це забезпечує рівномірний потік викопаної маси на елеватор і мінімізує втрати навіть на високій швидкості. Більшість сучасних західних машин обладнані також активними втягуючими валками для бадилля, які обертаються назустріч потоку і захоплюють картоплиння, відтягуючи його від бульб. Такі валки (гумові чи з пальцями) встановлено перед основним елеватором у комбайнах *Grimme*, *AVR* та інших. Вони значно зменшують забивання пристроїв при наявності зеленого гич'я.

Іншим прикладом є польський однорядний комбайн *Anna Z-644*, популярний у 1980–90-х роках. Він обладнаний пасивним лемешем, двома послідовними решітчастими елеваторами та простим механізмом відокремлення бадилля (гумовими бичами). Картопля із землі надходить на перший елеватор, де просіюється більша частина ґрунту, потім на другий – де відділяється бадилля і рештки; чисті бульби або складаються у мішки, або перевантажуються в бункер малого об'єму. При відносній простоті «*Анна*» забезпечує прийнятну якість

збору на легких і середніх ґрунтах, але на важких ґрунтах ефективність її сепарації погіршується, і зростають втрати та травмування бульб.

Сучасні топ-моделі, як от Grimme Varitron або AVR Puma, є самохідними багаторядними комбайнами з високотехнологічними системами копання. У їхніх конструкціях реалізовано все найкраще: *активні дискові ножі* з гідроприводом, *автоматичне регулювання глибини* через сенсори навантаження на леміш, кілька ступенів дбайливого очищення (в тому числі спіральні сепаратори, роликові ботводілювачі, системи відбору каміння). Наприклад, дворядний комбайн AVR Spirit 6200 (рис. 1.4) має пластикові діаболо-котки для копіювання поверхні гребенів та точного дотримання глибини, великі пружні притискні ролики для втягування гички і пару дискових ножів попереду лемеша. Після підкопування маса рухається по широкому (1,65 м) основному елеватору зі спеціальними вібраторами, далі проходить через другий грохотний елеватор під ботвовідділювачем, потім через кілька очисних вузлів (пальцеві транспортери, спіральні колеса, вентилятори тощо) і в кінці чиста картопля надходить на сортувальний стіл та в бункер. Усе це дозволяє збирати врожай з мінімальними втратами і пошкодженнями навіть на важких ґрунтах, однак конструкція таких машин надзвичайно складна і дорога.



Рис. 1.4. Дворядний комбайн AVR Spirit 6200

Кожен із розглянутих типів копальних органів має свої переваги та недоліки, що проявляються у продуктивності, якості викопування та рівні

пошкодження бульб. Пасивні лемішні органи вирізняються простотою і надійністю – вони майже не мають рухомих частин, тому рідко ламаються і потребують мінімум налаштувань. На легких піщаних ґрунтах такі органи цілком ефективні: пласт легко розпадається після підрізання, а бульби залишаються неушкодженими. Однак на важких суглинках суцільний леміш часто витягує великий моноліт землі, який погано кришиться, і значна частина дрібних бульб може залишатися в грудках. Крім того, тяговий опір суцільного лемеша досить великий – щоб його зменшити, доводиться загострювати леміш під гострим кутом і збільшувати кут атаки $\sim 23\text{--}26^\circ$, інакше леміш буде «спливати» вгору або зариватися. Це компроміс, який не завжди забезпечує оптимальне копання.

Транспортерно-грохотні (елеваторні) системи значно підвищують продуктивність, оскільки дозволяють рухатися без зупинок, виконуючи часткове очищення на ходу. Порівняно з суто лемішними копаками, втрати бульб зменшуються, бо картопля не засипається назад ґрунтом, а підхоплюється елеватором. Продуктивність дворядних елеваторних машин сягає 4–5 га за день проти $\sim 1,5$ га у кінних копачів. Однак більша швидкість і висота падіння бульб на транспортер можуть призводити до ударів і травмування. За агротехнічними вимогами, сумарні механічні пошкодження картоплі під час збирання повинні бути не більше $\sim 5\%$, і виробники вдосконалюють свої машини, щоб досягти цих показників. Наприклад, в конструкціях Grimme для зменшення ударів застосовано гумові прокладки на прутках елеваторів та спеціальні гасники падіння при перевантаженні в бункер. Загалом, транспортерно-грохотні органи ефективні на більшості типів ґрунтів, але потребують узгодження швидкості руху, частоти струшування та кута нахилу елеваторів під конкретні умови.

Дискові підкопувачі мають переваги на важких і щільних ґрунтах, де плугоподібний леміш зазнає великого опору. Обертові диски легше врізаються у щільний ґрунт, зменшуючи тягове зусилля. В польових випробуваннях було виявлено, що енергоспоживання при копанні дисковим органом може бути на

15–20% меншим, ніж у плоского лемеша. Також диски менше пошкоджують бульби зверху, адже не підіймають весь пласт різко вгору. Проте є ризик порізати картоплину диском збоку, якщо вона лежить близько до краю гребеня – це вимагає точної підтримки центру рядка. За якістю сепарації самі по собі диски не вирішують проблеми – все одно потрібен елеватор або інший орган для струшування землі. Тому в сучасних комбайнах диски працюють саме у поєднанні з лемешем і елеватором (фактично як допоміжні елементи).

Вібраційні органи потенційно можуть зменшити зусилля копання і поліпшити розпушення пласта, але на практиці їх застосування призводило до зростання динамічних навантажень і швидкого зношування вузлів машини. Крім того, дрібна постійна вібрація викликає мікропошкодження шкірки бульб – такі картоплини гірше зберігаються. Тому ефективність вібраційних копачів оцінюється як сумнівна: виграш у енерговитратах нівелюється погіршенням якості продукції. Наразі більш перспективним вважають використання помірних коливань малої амплітуди або пружно закріплених підкопувачів, що працюють без шкоди для бульб.

Валкові (роликові) органи демонструють хороше подрібнення грудок і дбайливе оброблення бадилля. Обертові валки ніби «прокатують» пласт, вдавлюючи грудки і витягуючи бадилля, що зменшує забивання елеваторів. Але складність конструкції (два синхронізовані валки, гідроприводи) і потенційне пошкодження бульб між валками обмежують їх використання. Найчастіше валкові схеми застосовують у бурякових комбайнах для очищення коренеплодів, а у картоплезбиранні вони лишилися на рівні експериментів.

Отже, за комплексом показників (простота, продуктивність, якість) нині найбільш оптимальним є комбінований підкопувальний орган: пасивний леміш повної ширини плюс активні диски і котки для допомоги. Така конструкція забезпечує прийнятний компроміс між низьким травмуванням, високою пропускною здатністю і помірною енергоємністю процесу. Чисто пасивні лемеші хоча й поширені, але поступаються за ефективністю; чисто активні

(вібро-, валкові) – надто складні і можуть більше шкодити бульбі. Саме тому переважна більшість сучасних картоплезбиральних машин використовує комбіновані копальні органи у різних конфігураціях.

Тенденції розвитку конструкцій копальних органів

Сучасні вимоги до механізованого збирання картоплі диктують необхідність пошуку конструкцій, що забезпечують бережне ставлення до врожаю, підвищення енергоефективності та зниження зношування деталей. Тенденції розвитку викопувальних робочих органів нині зосереджені на декількох напрямках.

1. Зниження пошкоджень бульб. Виробники впроваджують конструктивні рішення для м'якого контакту бульб із робочими органами. Наприклад, елементи зон контакту виготовляють з еластичних матеріалів: котки глибини – з гуми або пластику (так звані «*diabolo*» ролики), пруткові елеватори – з полімерними покриттями або навіть суцільними гумотканинними стрічками на ділянках прийому бульб. У бункерах встановлюють амортизатори падіння (гумові килимки, ланцюгові «фартухи»), що гасять швидкість картоплин при завантаженні. Деякі моделі оснащують спеціальними *датчиками удару*, які виявляють надмірне биття бульб об метал і сигналізують оператору про необхідність зменшити швидкість чи змінити налаштування. Так, у новітніх комбайнах Grimme EVO передбачено систему контролю пошкоджень, що регулює швидкість елеваторів і роботу перегрузочного шнека для мінімізації травмування картоплі.

2. Енергоощадність та продуктивність. Щоб зменшити тягове зусилля на копанні, конструктори оптимізують форму підкопуючих органів. Застосовуються біонічні форми лемеша – наприклад, профіль, змодельований за контуром голови сома (як обтічного об'єкта), що дозволяє зменшити опір ґрунту. Випробування таких біонічних лемешів показали до 17–20% менше зусилля в важких ґрунтах порівняно зі звичайним плоским лемешем. Інший підхід – часткова активізація лемеша: невеликі коливання низької частоти (4–6

Гц) в горизонтальній площині можуть знижувати опір без суттєвого пошкодження бульб. Також для економії енергії прагнуть забирати мінімум ґрунту разом з бульбами. Цьому допомагають бокові диски та правильне налаштування глибини: якщо леміш йде чітко під шаром бульб, зайвий ґрунт не рухається, і витрати палива менші. Сучасні комбайни обладнують автоматичними системами глибини копання (*TerraControl* у Grimme, *Automatic Depth Control* у Dewulf тощо), що за допомогою датчиків і гідравліки підтримують оптимальну глибину лемеша незалежно від нерівностей поля. Це не лише економить паливо, а й знижує втрати бульб через занадто мілке копання.

3. Підвищення зносостійкості та надійності. Робочі органи працюють у абразивному середовищі ґрунту, тому швидко зношуються. Тенденція – використання надміцних матеріалів і покриттів. Лемеші виготовляють зі спеціальних борвмісних сталей з твердістю ~45–50 HRC або постачають змінними наплавленими пластинами з карбиду вольфраму на ріжучій кромці. Дискові ножі роблять самозаточуваними і встановлюють на пружинних стояках, що амортизують удари об каміння (за аналогією з плугами, де є пружинний захист). Для пруткових елеваторів використовують високоякісну пружинну сталь або нержавіючі сталеві прутки, стійкіші до корозії і втоми металу. Крім того, щоб зменшити навантаження на вузли приводу, впроваджують часткову гідравлічну або електричну амортизацію: скажімо, в сучасних комбайнах багато валів приводу елеваторів обладнані обгінними муфтами та демпферами крутильних коливань. Це підвищує довговічність трансмісії при раптових зупинках (коли, наприклад, щось велике заклинить елеватор).

4. Адаптивність до умов збирання. Триває розвиток універсальних і переналагоджуваних систем копання. Компанії пропонують змінні комплекти робочих органів на одну машину: можна встановити інший тип лемеша (ширший або вузьчий), додати чи зняти бокові диски, замінити агресивні бичі на делікатніші щіткові очисники залежно від стану ґрунту і врожаю. В Японії, наприклад, фірма Sanei розробила модульний копач, де фермер сам обирає,

використовувати суцільний леміш чи дискові підкопувачі, залежно від того, яка картопля (столова чи чипсова) і наскільки поле засмічене камінням. Така гнучкість – ознака сучасної техніки.

5. Інтеграція електроніки. Нові моделі обладнуються датчиками для контролю роботи копальних органів у режимі реального часу. Вимірюються параметри: глибина ходу лемеша, крутний момент на валах елеватора (який зростає при перевантаженні або забиванні), вібрація рами тощо. На основі цих даних бортова електроніка може самостійно сповільнити рух чи зупинити подачу, щоб уникнути поломки, або навпаки – підвищити швидкість транспортерів при легкому ґрунті. Деякі системи навіть оцінюють кількість бульб, що залишаються на поверхні за комбайном, за допомогою камер, і якщо перевищено допустимий рівень втрат, сигналізують про проблему з налаштуванням копача.

У підсумку, розвиток конструкцій викопувальних робочих органів іде в бік комплексної оптимізації: знайти баланс між дбайливим ставленням до картоплі та високою продуктивністю. Найближчим часом можна очікувати появи нових матеріалів (композитів) для лемешів, широкого застосування електрогідравлічних систем керування глибиною та адаптивних алгоритмів, що автоматично підлаштовують роботу копальних органів під конкретні умови поля. Мета залишається незмінною – забезпечити механізоване збирання з мінімальними втратами, високою якістю і економічно вигідною продуктивністю, що особливо важливо для України як одного зі світових лідерів у виробництві картоплі.

1.2. Вібраційне зміцнення методом динамічного деформування

Активне застосування високоміцних сплавів у промисловості та підвищення інтенсивності сучасних процесів металообробки зумовили зростання інтересу до використання вібраційних режимів під час формоутворення та

зміцнення металів [3]. Сутність вібраційної обробки полягає у механічному або комбінованому (механохімічному) впливі на поверхню, що спричиняє відокремлення дрібних частинок матеріалу та вирівнювання мікрорельєфу шляхом локального пластичного деформування.

Будь-який вібраційний процес супроводжується багаторазовими дрібними ударами, які передаються або інструменту, або самій деталі, забезпечуючи циклічне навантаження поверхні [4]. Протягом останніх років вібраційні способи оброблення та відповідні установки набувають широкого поширення в різних секторах промисловості. Їх використання дає змогу прискорити перебіг багатьох технологічних операцій, зменшити трудомісткість і підвищити рівень механізації та автоматизації виробництва. Вібраційна технологія розглядається як прогресивний напрям машинобудування, потенціал якого ще далеко не вичерпаний [5].

Особливо перспективним цей метод є під час виконання зміцнюючих, шліфувальних і полірувальних операцій. Ефективність вібраційного впливу визначається низкою факторів: механічними характеристиками матеріалу деталі, її геометричними параметрами, вибраними режимами оброблення тощо. Ключовими параметрами процесу є величина збуджувальної сили, амплітуда та частота коливань, а також швидкість руху інструмента.

Дія вібраційного зміцнення ґрунтується на динамічній природі процесу: поверхня деталі зазнає численних мікроударів робочого інструмента чи частинок робочого середовища. У результаті в приповерхневому шарі формується зона пластичної деформації, що приводить до появи стискальних залишкових напружень, зростання мікротвердості та зменшення параметрів шорсткості.

З позицій дислокаційної теорії пластичне деформування є не лише наслідком переміщення різних типів дефектів кристалічної ґратки під дією навантаження, а й основним механізмом зміни структури, форми та експлуатаційних властивостей матеріалу.

У багатьох технологічних операціях саме кероване пластичне деформування є ключовим методом надання деталям машин необхідних експлуатаційних характеристик, що безпосередньо впливає на підвищення їхньої довговічності та надійності роботи. Фундаментальною основою такого деформування виступає процес ковзання – переміщення частинок матеріалу вздовж площин, на яких діють найбільші зсувні напруження. На здатність металу до пластичних деформацій впливає комплекс чинників: хімічний склад та структура сплаву, інтенсивність деформації, температурні умови, габарити заготовки і специфіка схеми навантаження.

Для дослідження поведінки металів під дією тиску С. І. Губкін [6] запропонував поняття механічної схеми деформування, що представляє собою поєднання головних напружень та відповідних їм деформацій. Руйнування матеріалу після досягнення певного рівня пластичної деформації відбувається внаслідок відриву мікроскопічних частинок, коли нормальні напруження перевищують критичний поріг.

Величина пластичності визначається не лише конфігурацією головних напружень, а й рівнем середнього тиску. Зростання стискального середнього тиску сприяє помітному підвищенню пластичності, оскільки метал ущільнюється, внутрішні порожнини усуваються, міжкристалічний зсув ускладнюється, а внутрішньокристалічний перенос деформації — навпаки, активізується. Чим менший вплив розтягувальних напружень і чим більшу частку становлять стискальні, тим сильніше матеріал здатний деформуватись без руйнування [7].

Пластичність є не стільки вродженою властивістю металу, скільки станом, що формується при певних умовах навантаження. Навіть матеріали з низькою природною пластичністю можуть переходити до пластичного режиму при правильно вибраній схемі деформації [8].

Зародження пластичної деформації відбувається тоді, коли зсувні напруження досягають необхідної величини — максимальної при виході лінії

ковзання на поверхню під кутом 45° . Вібраційне навантаження забезпечує такі умови в момент, коли інструмент відділяється від поверхні деталі, формуючи короткочасні, але інтенсивні піки напружень.

Під час вібраційного зміцнення, яке супроводжується пульсуючим навантаженням, відбувається подрібнення зерен металу і їх орієнтація у напрямку прикладеного зусилля. Водночас відбувається укрупнення зерен, площини ковзання в яких розташовані під кутом 45° - тобто оптимально для виникнення пластичного зсуву. У таких умовах зсувні напруження стають максимальними, що забезпечує розвиток пластичної деформації.

Характер пластичності визначається не лише орієнтацією площин ковзання, а й присутністю дефектів ґратки — дислокацій, які є слабкими місцями міжатомних зв'язків. Під дією зсувних навантажень дислокації здатні переміщуватися уздовж площин ковзання, спричиняючи колективне зміщення атомів та збільшуючи рівень деформації.

У роботі [6] підкреслюється, що величина зусилля, необхідного для активізації пластичної деформації кристала, визначається двома факторами: кількістю дислокацій та здатністю цих дефектів до пересування всередині кристалічної структури.

Під час традиційного пластичного деформування передавання ковзання між кристалами відбувається послідовно: активні зони виникають у тих зернах, які найкраще зорієнтовані щодо напрямку прикладеного навантаження [2]. Передусім деформуються ті кристаліти, у яких площини ковзання розташовані під кутом 45° до прикладеної сили. Вони спричиняють зсув у сусідніх зернах, ґратки яких орієнтовані менш сприятливо.

При вібраційному навантаженні закономірності формування ліній ковзання істотно відрізняються. Вібраційний вплив зменшує контактне тертя між інструментом та деталлю, а також змінює характер руху дислокацій за рахунок специфічної дії інерційних сил. Такі умови суттєво зменшують опір деформації у зоні контакту й активізують пластичні процеси.

Оскільки під час вібраційних коливань практично в усіх зернах, близьких до поверхні, відбувається інтенсивне збудження дислокацій, ковзання розгортається майже синхронно в усьому приповерхневому шарі [7].

Різного роду дефекти будови кристала – викривлення ґратки, неметалеві включення та особливо межі зерен – створюють суттєві перешкоди руху дислокацій. Накопичення дислокацій біля цих бар'єрів гальмує утворення нових дефектів кристалічної структури. Вібраційне деформування сприяє подрібненню зерен та утворенню блокової структури, що збільшує протяжність меж і, відповідно, кількість зон концентрації дислокацій. Саме це пояснює механізм підвищення міцності матеріалу.

Під час вібраційної обробки створюються умови як для вільного переміщення дислокацій, так і для інтенсивного їх зародження. Зі збільшенням ступеня деформації шлях переміщення дислокацій скорочується, їх густина зростає, а взаємодія стає більш інтенсивною. Формування дислокаційних скупчень («клубків») утворює перешкоди для подальшого руху нових дислокацій, сприяючи зміцненню матеріалу та появі характерних смуг ковзання [2].

В Україні питанням розвитку вібраційних технологій та створення відповідного обладнання присвячені численні дослідження провідних учених [3–5].

У процесі вібраційного впливу робоча частина інструмента періодично відривається від поверхні деталі, створюючи мікроінтервали розвантаження між контактними поверхнями. Інтенсивність динамічної дії зростає разом зі збільшенням частоти та амплітуди коливань. Попри це, у літературних джерелах недостатньо даних про вплив цих параметрів на ступінь зміцнення поверхні [6–8].

Результати проведених досліджень свідчать, що найбільш істотні зміни під час вібраційного деформування відбуваються саме у приповерхневих шарах. Характер і структура зміцненого шару залежать від форми, геометрії й розмірів

інструмента, які підбираються відповідно до вимог до конкретної деталі та визначаються експериментально.

Вібраційне зміцнення є універсальним методом підвищення зносостійкості, особливо для деталей, що функціонують у середовищах з високою абразивністю – робочих органів ґрунтообробної техніки, бурякозбиральних і картоплезбиральних машин тощо.

Рівень зносостійкості після такої обробки значною мірою визначається глибиною зміцненого шару. Однак у доступних публікаціях відсутні чіткі рекомендації щодо методики визначення цього параметра.

Аналіз наявних літературних джерел свідчить, що механізми вібраційного зміцнення поверхонь деталей досі недостатньо досліджені. Т. М. Голубєв підкреслює, що оброблення металів тиском із застосуванням вібраційного навантаження вивчено неповно і потребує подальшого розвитку [3]. На сьогодні не існує цілісної теоретичної моделі цього процесу — лише окремі спроби пояснення явищ, які супроводжують деформацію під дією пульсуючих навантажень [4].

Узагальнюючи доступні дослідження, можна виділити такі ключові переваги методу вібраційного деформування:

1. Під час обробки суттєво змінюється характер контактного тертя внаслідок періодичного розриву взаємодії між поверхнею інструмента та деталлю у фазі зменшення контактного тиску.

2. Відбувається модифікація структури зміцнення поверхневого шару за рахунок часткового гальмування руху дислокацій та їхнього впливу на джерела дислокацій у сусідніх площинах ковзання.

Водночас у науковій літературі зустрічаються й суперечливі відомості щодо зміни структурного стану матеріалу після вібраційної обробки [5, 6]. Наразі відсутні уніфіковані рекомендації щодо оптимального вибору геометрії та розмірів інструмента; недостатньо пояснено, як різні матеріали реагують на вібраційне навантаження. Не встановлено закономірностей визначення

необхідної сили впливу залежно від режимів роботи, параметрів інструмента та характеристик деталі.

Недостатньо висвітлені також питання підвищення зносостійкості матеріалу деталей, що працюють в абразивних умовах, а також впливу вібраційного зміцнення на довговічність робочих органів картоплезбиральних машин. Попри те, що виробнича практика постійно розширює спектр задач, які потребують застосування механічних коливань для підвищення міцності поверхонь, багато авторів [7, 8] наголошують, що рівень наукового опрацювання цього процесу все ще залишається недостатнім.

Тому як з теоретичної, так і з прикладної точки зору актуальним є подальше вивчення вібраційного зміцнення деталей машин, що працюють у важконавантажених умовах, з метою визначення шляхів підвищення їх ресурсу та операційної надійності.

Висновки по розділу

Аналіз доступних наукових джерел дає можливість сформулювати такі узагальнення:

1. Попри те, що метод вібраційного деформування вже широко використовується в різних галузях промисловості, його потенціал у зміцненні та відновленні робочих поверхонь деталей сільськогосподарських машин досі реалізований недостатньо. Причиною цього є неповне вивчення механізмів та закономірностей даного процесу.

2. Нестача комплексних досліджень, науково обґрунтованих моделей і практичних рекомендацій щодо вібраційної обробки матеріалів істотно обмежує можливості застосування цієї технології для підвищення ресурсу відновлених деталей аграрної техніки.

3. Для формування цілісного розуміння перебігу процесів вібраційного впливу, закономірностей зміцнення поверхневих шарів та для розширення сфери

застосування вібраційних методів під час ремонту і підвищення довговічності деталей необхідно виконати подальші експериментальні дослідження.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Обладнання та прилади

Лабораторні випробування з відновлення дискових робочих органів методом вібраційного зміцнення виконували на спеціально спроектованій експериментальній установці, загальний вигляд якої наведено у додатку А.

Створена вібраційна установка забезпечує виконання операцій роздачі, обтиску та зміцнення поверхневих шарів за заздалегідь заданими технологічними параметрами, такими як амплітуда і частота коливань, швидкість обробки та збуджувальна сила. Конструкція установки містить елементи кріплення робочого інструмента й відновлюваної деталі та включає три основні вузли: вібраційний агрегат, опорну основу з додатковим оснащенням і гідравлічну систему, що забезпечує вертикальне переміщення вібратора разом з інструментом.

Вібраційний модуль побудований на базі вібратора ІВ-105 із регульованим дебалансним механізмом, який дозволяє змінювати величину збуджуючої сили в межах 9,4–24,5 кН. Регулювання амплітуди коливань та сили здійснюється шляхом зміни положення дебалансів відносно вертикальної осі вала електродвигуна.

Гідравлічна частина системи забезпечує притискання інструмента, що здійснює коливання, до поверхні відновлюваної деталі, стабілізуючи якість і рівномірність впливу. Схема роботи установки наведена на рис. 2.1.

Вібратор (10) закріплений на жорсткій зварній плиті (9), до якої змонтовано патрон (11) для закріплення робочого інструмента (13). Увесь вібраційний вузол переміщується по чотирьох напрямних (12), встановлених на вертикальних стійках (14). Стійки закріплені на двох опорних плитах (20), що розміщені на дерев'яних брусах (21), які виконують роль амортизувальної

підставки й одночасно поглинають небажані коливання. Додаткову віброізоляцію системи забезпечують гумові амортизатори (22), на яких спирається основа.

Подача масла від гідравлічного насоса (3), що приводиться в дію електродвигуном (1) типу 4A132M243, здійснюється через розподільник P-75 (4) у гідроциліндри ЦС-100 (7). Це забезпечує поступове переміщення вібраційного блока разом з інструментом у напрямку до оброблюваної деталі.

Додатково установка оснащена варіатором приводу з клинопасовою передачею між електродвигуном (1) та гідронасосом (3), що дозволяє точно регулювати швидкість руху штоків гідроциліндрів. Для контролю та стабілізації зусилля обробки використовуються манометр та спеціальний механізм фіксації показань.

Під час опускання вібраційного вузла робочий інструмент (13) здійснює зміцнення відновлюваної деталі (16), яка закріплюється в матриці (17).

Для оцінювання впливу типу навантаження (статичного та вібраційного) на міцнісні характеристики матеріалу оброблюваних деталей дослідження проводили спочатку на модельних зразках, а вже потім — безпосередньо на робочих елементах машин. Як зразки було використано нові диски копачів, що дало змогу уникнути впливу таких змінних, як різний ступінь зношення та різнохарактерні дефекти поверхні. Подальші експерименти на дисках, що вже були в роботі та мали природне зношення, дали можливість уточнити та скорегувати основні параметри технології обробки.

Відновлення поверхні дисків копачів здійснювали методами наплавлення під шаром флюсу та вібродугового наплавлення на універсальній установці (рис. 2.2), що забезпечує обробку деталей діаметром до 700 мм.

Конструктивно установка являє собою сталеву зварну станину (виготовлену з кутиків 50×75 мм), на якій змонтовано: електродвигун у комплекті з редуктором, дисковий варіатор, шпindel з затискним патроном, систему напрямних з кареткою для закріплення наплавлювальної головки і

задньої бабки, пристрої для збору та просіювання флюсу, а також обладнання для горизонтального наплавлення (рис. 2.1).

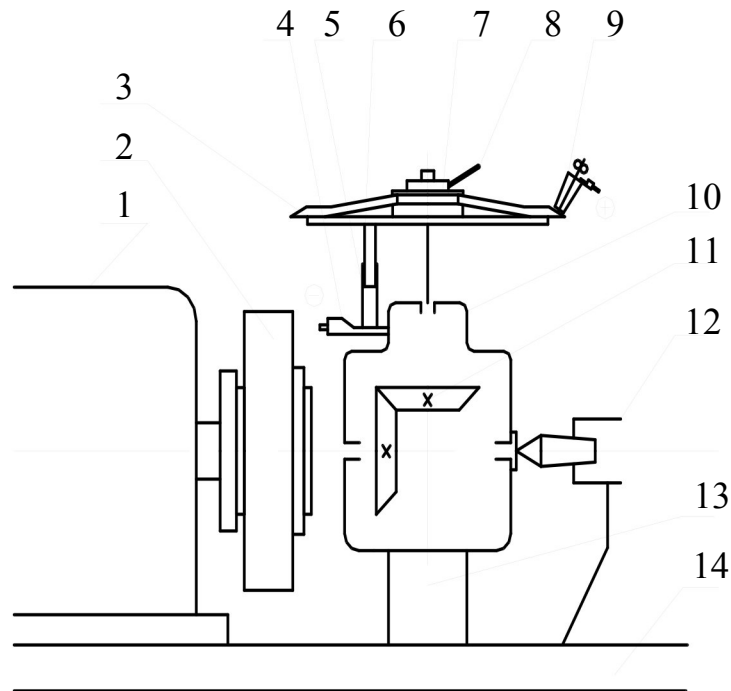


Рис. 2.1. Схема наплавлення. Позначення: 1 – передня опора; 3 – деталь, що наплавляється; 2 – патрон; 4 – електропровід; 5 – щітка; 6 – контактна пластина; 7 – притискна шайба; 8 – затискач; 9 – наплавлювальна головка; 10 – корпус редуктора; 12 – задня бабка; 11 – конічна шестерня; 13 – кронштейн; 14 – станина.

Пристрій складається з корпуса редуктора (10), пари конічних шестерень (11), контактної пластини (6), притискної шайби (7), затискного елемента (8), щіткотримачів зі щіткою (5) та опорного кронштейна (13).

Процес наплавлення поверхні відновлюваної деталі здійснювали таким чином. Горизонтальний вал конічного редуктора фіксували в патроні (2) наплавлювальної установки, після чого його додатково підтримували задньою бабкою (12). У затискному механізмі закріплювали деталь (3), що підлягала наплавленню. Обертальний рух передавався на неї від шпинделя через конічну зубчасту передачу, забезпечуючи її обертання навколо вертикальної осі редуктора.

До зношеної ділянки підводили мундштук наплавлювальної головки (9), а переміщення інструмента здійснювали за допомогою ходового гвинта установки.

Відновлення дисків копачів виконували методом приварювання сегментних шин, виготовлених зі сталі 45 або сталі 10, дротом діаметром 2 мм зі сталі 08ГС, після чого проводили наплавлення шаром сормаїту. Сегментні шини виготовляли товщиною 10 мм і шириною 36 мм.

Параметри вібраційного навантаження становили: амплітуда коливань вібратора – 0,25...0,75 мм, частота обертання – 1400...2800 хв⁻¹, тривалість зміцнення – 15...45 с.

У процесі зміцнення товщина леза дисків змінювалась у межах 0,5...2,5 мм, а кут загострення ріжучої крайки становив 110°, 130° або 150°.

2.2 Установка для експериментального визначення зношування дискових копачів

Дискові ножі картолезбиральних комбайнів як активні, так і пасивні працюють у середовищі, насиченому абразивними частинками ґрунту, що спричиняє інтенсивне абразивне зношування. У результаті поступового руйнування ріжуча крайка тупиться, а діаметр диска зменшується. Досягнення граничної товщини леза та критичного зменшення діаметра призводить до помітного зниження ефективності роботи дискових ножів.

Для порівняння зносостійкості дисків, відновлених різними технологічними методами, використовували спеціалізований дослідницький стенд, схему якого наведено на рис. 2.2.

Стенд являє собою установку, що включає круговий канал (9), заповнений абразивною сумішшю, обертове колесо (4) з кронштейнами для закріплення пасивних робочих органів, а також візок (5) для розміщення випробовуваних дисків. Поступальний рух забезпечує привідна система, яка складається з електродвигуна (2), коробки передач і конічного редуктора.

Для встановлення дискових ножів у конструкції стенда передбачено привідний візок (5), який телескопічно з'єднаний із кронштейном обертового колеса (4). Візок складається з несучої рами та опорних катків, один із яких має ребристу поверхню. Облік часу роботи ножа здійснювали за допомогою електричного лічильника, а синхронність його функціонування зі стендом забезпечували одночасним вмиканням магнітного пускача обох пристроїв.

У процесі випробувань дисковий ніж виконує поступальний рух разом із приводним колесом, а його обертання забезпечується електродвигуном візка. Вертикальні мікроколивання створюються ребристою поверхнею катка. Сукупність цих рухів дає можливість достатньо точно відтворити умови реальної роботи дискових ножів у полі.

Прямолінійний поступальний рух ножа в реальних експлуатаційних умовах на стенді замінено рухом по коловій траєкторії радіусом R . Під час такого руху абразивна суміш, що оточує ніж, набуває тієї ж швидкості та під дією відцентрової сили зміщується у радіальному напрямку. Це може змінювати характер зношення ножа.

Підбираючи оптимальне значення радіуса R , можна зменшити дію інерційних сил настільки, що радіального переміщення абразивної суміші не відбуватиметься.

За максимальної швидкості руху робочого органу $v = 2,88$ м/ста коефіцієнта $f = 0,42$, розрахунковий радіус диска повинен був перевищувати $R > 2,015$ м. У практичних умовах для проведення досліджень прийняли радіус $R = 2,2$ м.

Механічний склад абразивної суміші, що використовувалася в ґрунтовому каналі стенда (табл. 2.1), визначали експериментально, орієнтуючись на середню швидкість радіального зношування дисків і дотримуючись рекомендацій роботи [1].

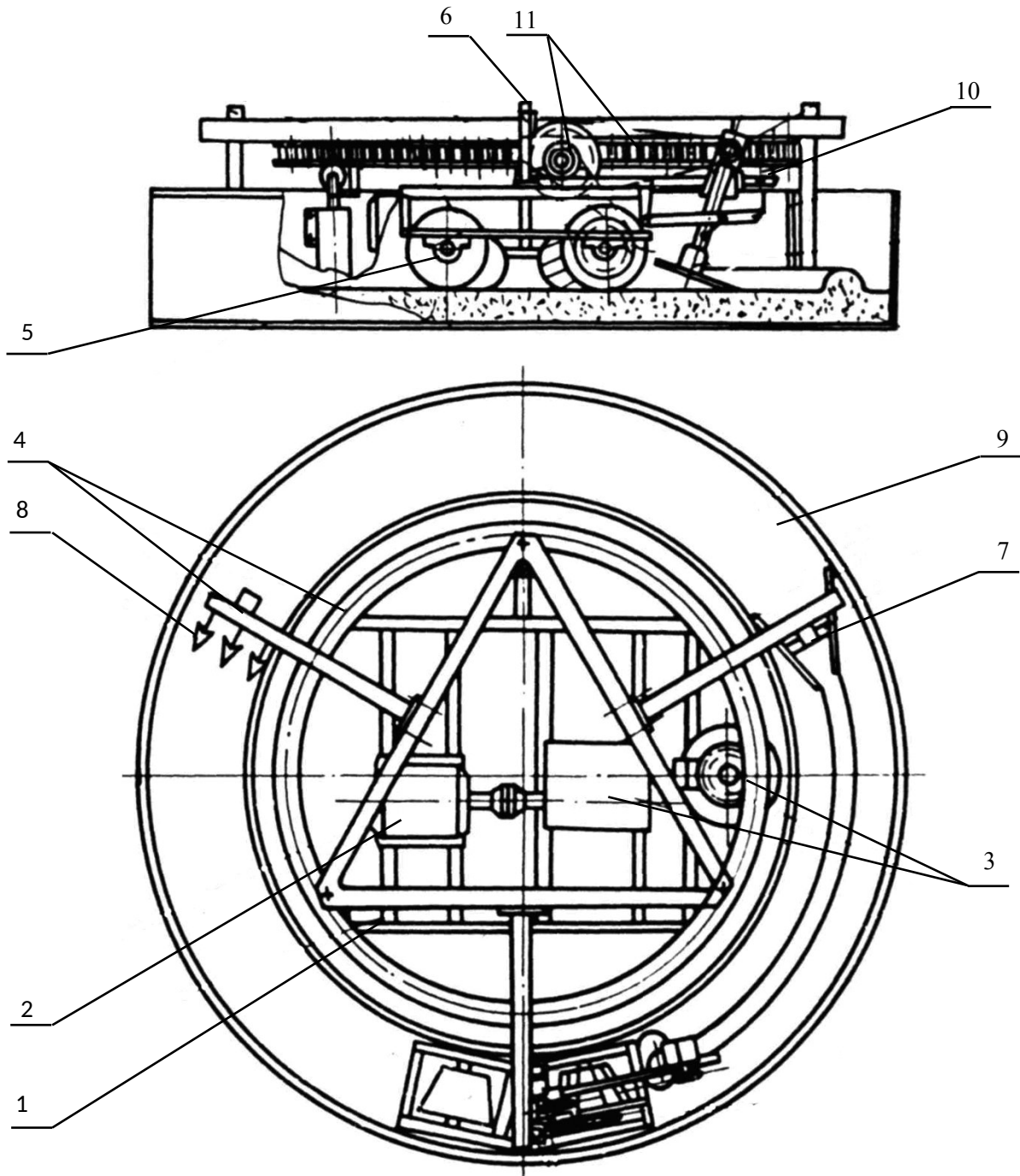


Рис. 2.2. Схема стенда для дослідження зношування дискових ножів: 1 – несуча рама; 2 – електричний двигун; 4 – колесо з кронштейном; 3 – передавальний механізм; 6 – телескопічні напрямні; 5 – приводний візок; 8 – розпушувальний елемент; 7 – опорний валик; 9 – кільцевий лоток, заповнений абразивною сумішшю; 10 – регулювальний гвинт; 11 – ланцюгова передача.

Щоб забезпечити відтворюваність і коректність результатів випробувань, вологість абразивної суміші підтримували в установлених межах, контролюючи

її прямим методом. Вимірювання вологості виконували за допомогою вологоміра та датчика, який працює на основі змін діелектричної проникності матеріалу.

Таблиця 2.1 – Гранулометричний склад абразивної суміші

Показники	Фракційний склад суміші			
	Суміш піску і гравію		Глина, цемент	Пил
Розміри частинок, мм	от 1 до 0,25	от 0,25 до 0,05	от 0,05 до 0,01	менше 0,01
Кількість, %	44	35	11	10

Оскільки діелектрична проникність води у 15–20 разів перевищує відповідний показник ґрунту, навіть незначне коливання вологості викликає помітну зміну діелектричних властивостей матеріалу [6].

Рівень вологості абразивної суміші визначали електронним вологоміром, який працює як високочастотний генератор. Точність його вимірювань головним чином залежала від правильності попереднього тарування й не виходила за межі 1–2%. Калібрування приладу здійснювали шляхом порівняння його показань з результатами визначення вологості зразків ваговим методом.

Під час роботи стенда вологість абразивної суміші поступово зменшувалася. Коли електронний вологомір фіксував нижню допустиму межу (2%), вологість доводили до нормативного рівня (4%) шляхом додавання необхідної кількості води.

У процесі експериментальних досліджень дискових ножів кожні дві години виконували вимірювання радіального лінійного зношування та контроль основних параметрів ріжучої крайки.

2.3 Вивчення структурних характеристик та експлуатаційних властивостей.

Мікроструктурний аналіз є необхідним етапом для встановлення того, як різні види обробки впливають на властивості матеріалу дисків копачів, а також для обґрунтованого вибору оптимальних режимів технології їх відновлення [6, 7].

Дослідження мікроструктури проводили в науково-дослідній лабораторії ВАТ «Центр Матеріалознавства» (м. Київ).

Для виконання аналізу з дисків, відновлених різними методами, вирізали зразки та виготовляли мікрошліфи за такою послідовністю:

1. Із дисків вирізали потрібні фрагменти та виконували їх попереднє полірування.
2. Грубе шліфування, тобто усунення нерівностей за допомогою абразивних матеріалів, здійснювали на абразивному крузі.
3. Далі проводили тонке шліфування у декілька етапів:
 - мокре шліфування абразивною шкіркою із зерном 100 мкм;
 - мокре шліфування на алмазному крузі АСО 80–63 мкм;
 - мокре шліфування на алмазному крузі АСО 60–40 мкм;
 - мокре шліфування на алмазному крузі АСО 20–10 мкм;
 - остаточна доводка на сукні з використанням алмазної пасти АСМ 0–1 мкм.
4. Фінішне полірування виконували протягом 15–20 хвилин на сукні з водою, допоки поверхня шліфа не ставала дзеркальною.

Для виявлення мікроструктурних особливостей застосовували метод хімічного травлення:

- поверхню шліфа попередньо очищували спиртом;
- протягом 5 секунд проводили травлення 3%-вим водним розчином азотної кислоти;

- після травлення зразок промивали проточною водою, висушували фільтрувальним папером і досліджували за допомогою мікроскопа МИМ-8М при збільшенні 100...200.

Розмір зерна визначали методом візуальної оцінки згідно з вимогами ДСТУ – шляхом порівняння структури шліфа із стандартною еталонною шкалою, після чого кожному зразку присвоювали відповідний бал [8, 9].

Підрахунок числа зерен виконували за методикою С. А. Салтикова: на виділеній ділянці мікрошліфа визначали кількість M вузлових точок та n багатокутних зерен, з яких n_1 - трикутники, n_2 - чотирикутники тощо.

Вимірювання твердості виконували у трьох точках периферії диска, рівномірно розташованих через 120° одна від одної (рис. 2.3).

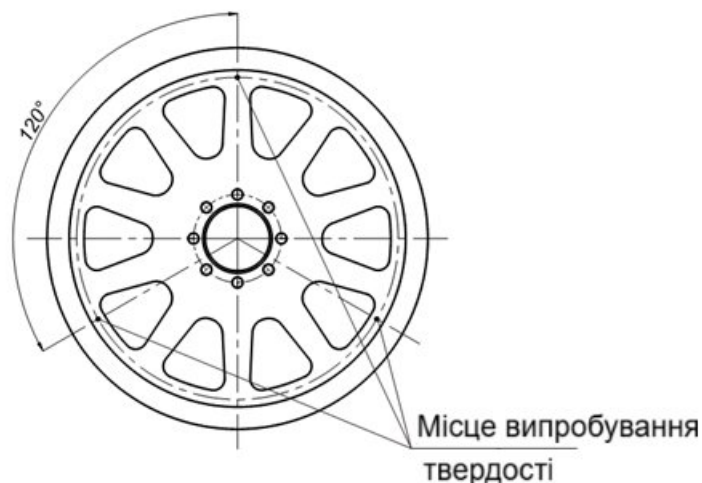


Рис. 2.3. Зона вимірювання твердості на робочому органі

Мікротвердість визначали за допомогою приладу ПМТ-3 при навантаженні 1,0 Н відповідно до встановленої методики.

2.4. Методичний підхід до визначення надійності робочих органів

Оцінювання надійності диска, робоча частина якого має форму двогранного клина, вимагало вибору таких показників, що найбільш точно відображають специфічні умови його експлуатації.

У процесі роботи геометричні параметри робочих органів поступово змінюються, що створює потребу у періодичному їх відновленні. Проміжок часу між двома суміжними відновленнями характеризує безвідмовність роботи (ресурс), яка є випадковою величиною. Довговічність диска визначається інтервалом часу від відновлення до повного вичерпання робочої зони, і цей показник також має випадковий характер.

Надійність робочого органа оцінюють за допомогою ймовірності безвідмовної роботи P_t , тобто ймовірності того, що товщина ріжучої крайки a не перевищить граничного значення a_n . Довговічність визначають ймовірністю $P(T)$ того, що радіальний знос не досягне граничної величини I_n .

Проведені дослідження засвідчили, що процес зношування робочих органів, а відповідно й збільшення товщини ріжучої кромки, яке обумовлене зносом ножа, підпорядковується нормальному закону розподілу.

2.5 Режими стендових випробувань

Стендові дослідження, на відміну від інших методів оцінювання, дають можливість не лише отримувати статистичні дані, але й оперативно керувати ходом експерименту: змінювати параметри впливу, моделювати різні умови роботи та у відносно стислий термін порівнювати кілька варіантів технологій з метою вибору найефективнішої.

Під час проведення випробувань забезпечували дотримання умов, максимально близьких до реальних, тобто таких, за яких характер відмов та закономірності їх розвитку відповідали фактичній роботі дисків копачів у полі.

Стендові випробування дисків, відновлених різними технологічними підходами, здійснювали у круговому ґрунтовому каналі (рис. 2.2), де замість прямолінійного руху робочий орган переміщувався по коловій траєкторії радіуса R . Щоб мінімізувати радіальне зміщення абразивного середовища – явище, здатне спотворити реальний характер зношування – підбирали оптимальне

значення радіуса R . Вдалих вибір R дозволяє зменшити відцентрові сили інерції настільки, що абразив у каналі практично не зміщується.

Склад абразивної суміші визначали з урахуванням рекомендацій [1, 11]. Вона містила 70–75% кварцового піску, дрібного гравію та глини. Необхідний рівень вологості (2–5%) встановлювали експериментально за допомогою електронного вологоміра ЭВ-2.

За допомогою спеціального пристрою, змонтованого на рамі, формували валик абразивної суміші потрібної форми, щільності та вологості в зоні контакту з досліджуваним робочим органом.

Під час стендових випробувань визначали геометричні параметри ріжучої крайки дискового ножа – його товщину, величину радіального зношування та кут загострення.

Контроль цих показників здійснювали на етапах тривалості випробувань 0, 2, 4, 6 та 8 годин.

Експлуатаційні випробування стали завершальним етапом комплексного дослідження, спрямованого на оцінювання ефективності різних технологічних методів відновлення дисків копачів картоплезбиральних комбайнів.

До програми випробувань включили шість варіантів дисків:

- нові диски зі сталі 65Г;
- диски, відновлені приварюванням сегментних шин зі сталі 45 з подальшим наплавленням сормайтотом;
- диски, відновлені приварюванням шин зі сталі 10 та наступним наплавленням сормайтотом;
- диски з привареними шинами зі сталі 45, на які наносили покриття методом вібродугового наплавлення;
- диски, відновлені приварюванням шин зі сталі 45, наплавлені сормайтотом і додатково зміцнені методом вібраційного деформування;
- нові диски зі сталі 65Г із привареними ребрами на пасивні елементи.

Експлуатаційні дослідження виконували на комбайнах моделей у господарствах Житомирської області.

Метою випробувань було оцінити реальну експлуатаційну надійність кожного з варіантів, зокрема їхню зносостійкість та довговічність, у фактичних умовах роботи.

Висновки по розділу

Методологічна побудова роботи здійснювалася за таким принципом. З метою підвищення довговічності картоплезбмашин виконано детальний аналіз причин дострокового виходу з ладу їхніх елементів. Установлено, що одними з найбільш уразливих у процесі експлуатації є робочі органи копачів. Проаналізовано існуючі підходи до їх відновлення, проте з'ясовано, що узгодженої позиції щодо найефективнішої технології на сьогодні не існує. У зв'язку з цим була сформована методика порівняльних експериментальних досліджень, спрямована на комплексну оцінку властивостей та зносостійкості робочих органів копачів.

У процесі вибору оптимального технологічного процесу відновлення робочих органів картоплезбиральної техніки запропоновано використання нового обладнання та визначено параметри обробки, які були випробувані й оцінені в умовах стендових та експлуатаційних досліджень.

Для обґрунтування параметрів відновлення робочих органів застосовано комплексний підхід, що включав багатофакторне планування експерименту, аналіз мікроструктури та властивостей матеріалу, визначення зносостійкості деталей і оцінювання їхньої надійності під час роботи в реальних умовах експлуатації.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Вплив тривалості зміцнення на зміну параметрів дискового ножа

Для експериментальної перевірки теоретичних положень щодо доцільності застосування вібраційного зміцнення робочих дисків копачів картоплезбиральних машин було проведено обробку дисків після їх відновлення приварюванням шин зі сталі 45 та сталі 10 з наступним наплавленням шаром сормайтю.

Величина деформації диска копача – як у радіальному напрямку, так і вздовж траєкторії руху робочого інструмента – залежить від кількох основних чинників: методу відновлення, амплітуди та частоти коливань інструмента, властивостей матеріалу, використаного при ремонтному відновленні, а також часу зміцнення.

З метою дослідження впливу амплітуди коливань на рівень деформації проводили вібраційну обробку дисків діаметром 680 мм. У роботі використовували три значення амплітуди: 0,25; 0,5 та 0,75 мм, обґрунтовані теоретичними розрахунками, наведеними в розділі 3.

У випробуваннях використовували такі варіанти зразків-дисків:

- нові диски зі сталі 65Г (варіант 1);
- диски, відновлені приварюванням шин зі сталі 45 з подальшим наплавленням сормайтом (варіант 2);
- диски, відновлені приварюванням шин зі сталі 10 та наплавленням сормайтом (варіант 3);
- диски, відновлені приварюванням шин зі сталі 45 з нанесенням покриття методом вібродугового наплавлення (варіант 4);

Частоту коливань інструмента змінювали в діапазоні 1400–2800 хв⁻¹, відповідно до теоретичних передумов, підтверджених попередніми дослідженнями.

Для забезпечення достовірності результати кожного експерименту повторювали п'ять разів. Вимірювання радіальної деформації та товщини ріжучої крайки проводили за методикою, описаною в попередніх розділах.

Зміни параметрів диска в контрольних точках визначали як середнє арифметичне значення різниць між повторними вимірюваннями до та після обробки. Узагальнені результати вимірювань наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Зміна параметрів дисків в залежності від технології їх відновлення

Варіант дискового ножа	Час обробки,	Приріст діаметра диска, мм	Зменшення товщини диска, мм
Варіант 1	15	1,79	0,116
	30	2,42	0,163
	45	3,23	0,192
Варіант 2	15	4,26	0,189
	30	5,15	0,274
	45	6,08	0,328
Варіант 3	15	5,62	0,205
	30	6,33	0,288
	45	7,53	0,369
Варіант 4	15	3,58	0,238
	30	4,28	0,331
	45	5,22	0,396

Проведені дослідження показали, що найбільше збільшення діаметра дискових ножів – 7,52 мм спостерігалось у випадку їх відновлення шляхом

приварювання шин зі сталі 10 з подальшим нанесенням шару сормайт. Водночас найбільше зменшення товщини ріжучої крайки 0,395 мм — зафіксовано після вібраційної обробки дисків, які відновлювалися приварюванням шин зі сталі 45 з наступним вібродуговим наплавленням.

Залежність зміни діаметра дискових ножів від тривалості вібраційного зміцнення за амплітуди коливань робочого інструмента $A = 0,5$ мм наведено на рис. 3.1.

Експериментально визначене зменшення товщини леза (Δa) після завершальної операції вібраційного зміцнення для зазначених варіантів дисків подано на рис. 3.2.

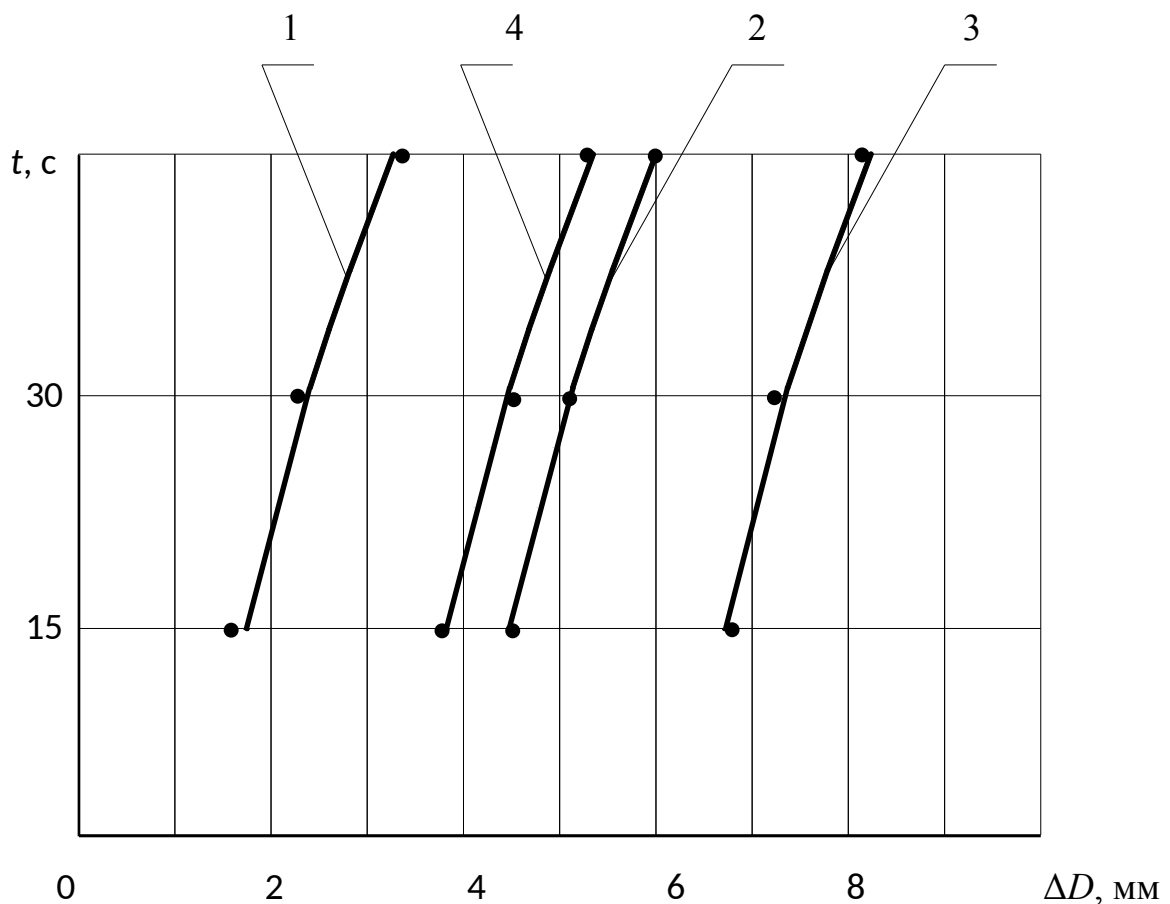


Рис. 3.1. Приріст діаметра дискового ножа для різних варіантів виконання: 1 – новий диск; 2 – диск, відновлений приварюванням шин зі сталі 45 з подальшим наплавленням сормайт; 3 – диск, відновлений приварюванням шин зі сталі 10 та наступним наплавленням сормайт; 4 – диск, відновлений приварюванням шин зі сталі 45 з вібродуговим наплавленням сплавом X12.

Експериментальні дані показали, що зміна діаметра ріжучої частини дисків та зменшення товщини леза під час вібраційного зміцнення мають однакову закономірність: за тривалості обробки до 30 с ці залежності є майже лінійними, тоді як після перевищення цього порога набувають криволінійного характеру.

Проведені експериментальні дослідження щодо застосування вібраційного зміцнення засвідчили, що за тривалості обробки $t = 15$ с найбільша інтенсивність збільшення діаметра – 0,387 мм/с спостерігалася у дисків, відновлених приварюванням шин зі сталі 10 з подальшим наплавленням сормайттом. Найменше зростання діаметра – 0,119 мм/с – було зафіксовано у нових дисків.

Щодо зміни товщини ріжучої частини, максимальна інтенсивність її зменшення становила 0,016 мм/с у дисків, відновлених приварюванням шин зі сталі 45 із вібродуговим наплавленням. Мінімальна інтенсивність – 0,007 мм/с – характерна для нових дисків.

На основі експериментальних результатів сформульовано такі висновки:

- Оптимальна амплітуда коливань інструмента становить $A = 0,5$ мм. Зі збільшенням амплітуди спостерігається нерівномірність приросту діаметра диска по колу — від 0,75 до 1,22 мм. Зменшення амплітуди у 1,5–1,74 раза приводить до відповідного зменшення деформації в радіальному напрямку.
- Найбільша радіальна деформація (7,52 мм) проявляється у дисків, відновлених приварюванням шин зі сталі 10 з наступним наплавленням сормайттом. Максимальне зменшення товщини леза (0,395 мм) зафіксовано у дисків, відновлених приварюванням шин зі сталі 45 із вібродуговим нанесенням сормайтту.
- Диски копачів, відновлені приварюванням шин зі сталі 10 та наплавлені сормайттом, при радіальному зносі до 6,5 мм можуть бути доведені до номінальних розмірів за допомогою вібраційного деформування.

3.2. Оптимізація параметрів вібраційної обробки

Величина деформації є одним із ключових параметрів процесу відновлення дисків копачів картоплезбиральних машин, оскільки саме вона компенсує певну частину їхнього зносу. У зв'язку з цим надзвичайно важливим є встановлення залежностей між зміною діаметра диска, товщиною його ріжучої крайки та амплітудою коливань інструмента під час деформування.

У дослідженнях використовували диски діаметром 680 мм, з товщиною леза 2,5 мм та кутом загострення $11...15^\circ$. Амплітуду коливань робочого інструмента варіювали в межах 0,25–0,75 мм. Кожне вимірювання проводили п'ять разів, дотримуючись методики, описаної в розділі 2.

Зміни геометричних параметрів у контрольних точках визначали як середнє арифметичне різниці між результатами повторних вимірювань до та після обробки. Величину деформації в радіальному напрямку і за висотою диска визначали як функцію амплітуди та тривалості впливу, використовуючи середні значення, отримані за результатами обробки трьох зразків.

На основі експериментальних даних побудовано криві залежностей радіальної деформації диска (ΔD) та зміни товщини ріжучої крайки (Δa) від амплітуди коливань інструмента a та часу обробки t при вібраційному деформуванні дослідних зразків. (рис. 3.2).

Аналіз наведених на рис. 3.2 залежностей показує, що характер зміни кривих приросту діаметра диска та зменшення товщини його ріжучої кромки при різних значеннях амплітуди коливань інструмента є подібним. Найбільші зміни цих параметрів спостерігаються за амплітуди $A=0,5\text{мм}$, тоді як мінімальні — за амплітуди $A=0,75\text{мм}$.

Причину такої поведінки слід шукати у динаміці контакту інструмента з поверхнею деталі: при амплітуді $A=0,75\text{мм}$ інструмент частіше й на більшу величину відривається від поверхні, унаслідок чого навантаження стає ударним і знижує пластичність матеріалу. За амплітуди $A=0,25\text{мм}$, навпаки, ефект вібраційного впливу проявляється недостатньо інтенсивно.



Рис. 3.2. Зміна деформації диска в радіальному напрямку (ΔD) та за товщиною леза (Δa)

Для прикладу, приріст зовнішнього діаметра диска при амплітуді $A = 0,5$ мм перевищує аналогічний показник при $A = 0,25$ мм у 1,11 раза, а порівняно з $A = 0,75$ мм – у 1,33 раза. Це можна пояснити сумісною дією статичних та циклічних напружень, які сприяють активнішому переміщенню ліній ковзання та, відповідно, збільшенню радіальної деформації.

Результати експериментів дозволяють сформулювати такі узагальнення:

- амплітуда коливань $A = 0,5$ мм є оптимальною для процесу вібраційного зміцнення;
- зі збільшенням тривалості обробки спостерігається наростання приросту діаметра диска, причому за часу $t = 5...15$ с ця залежність є майже лінійною;

- за амплітуди $A = 0,5\text{мм}$ інтенсивність збільшення зовнішнього діаметра при $t = 30\text{с}$ є у 4,52 раза вищою, ніж при $t = 45\text{с}$, що свідчить про зниження ефективності процесу після певного порога дії.

3.3. Оцінювання структури матеріалу зразків

Макроструктурний аналіз виконували за методом Баумана. Площину шліфа обирали в поздовжньому напрямку, оскільки саме в цьому перерізі структурні особливості проявляються найповніше. Отримані відбитки досліджували за зображенням, зафіксованим на бромосрібному фотопапері. Розмір зерна визначали методом візуальної оцінки згідно з ISO. Метод ґрунтується на порівнянні видимих під мікроскопом зерен із еталонною шкалою, яка являє собою схематизовану сітку, що обмежує зерна середньої величини [1, 10].

Зразки для мікроструктурних досліджень вирізали на фрезерному верстаті з ріжучої частини дисків копачів чотирьох варіантів:

нові диски зі сталі 65Г;

диски, відновлені приварюванням шин зі сталі 45 з подальшим наплавленням сормайттом;

нові диски зі сталі 65Г після вібраційного зміцнення;

диски, відновлені шинуванням зі сталі 45 та наплавленням сормайту, які додатково піддавали вібраційному деформуванню.

Отримані результати свідчать, що вібраційне зміцнення сприяє формуванню більш дрібнозернистої й однорідної структури металу порівняно з необробленими зразками. Так, після вібраційного деформування величина зерна відповідала 9 балам, тоді як без обробки цей показник становив лише 5 балів.

Глибину деформованого шару визначали за допомогою окуляра з вимірювальною сіткою, попередньо відкаліброваного об'єктмікрометром. Установлено, що всі досліджувані зразки мають феритно-перлітну структуру.

Під дією вібраційного навантаження зерна зазнають витягування у напрямку руху інструмента.

Глибина деформованого шару у зразків зі сталі 65Г після вібраційного зміцнення була у 1,69 раза меншою, ніж у дисків зі сталі 65Г, відновлених приварюванням шин зі сталі 45 та наплавленням сормаїту. Найбільші зміни структури простежувалися в приконтактних шарах матеріалу, де спостерігалось істотне підвищення ступеня деформованості та зміцнення.

За результатами проведених досліджень можна сформулювати висновок: при вібраційному деформуванні структура металу стає більш рівномірною, однорідною та дрібнозернистою, а зміна структури простежується на глибину 160...270 мкм.

3.4. Дослідження експлуатаційної довговічності дисків копачів

Активні та пасивні диски копачів працюють в інтенсивно абразивному середовищі, зазнаючи дії ґрунтових частинок різного гранулометричного складу та вологості. Тому для визначення їх реальної експлуатаційної стійкості відновлені та зміцнені вібраційним методом диски встановлювали на картоплезбиральні комбайни, що працювали в господарствах Житомирської області. Для порівняння було зібрано дані щодо ресурсу 72 дисків копачів.

Під час експлуатаційних випробувань відмов у роботі комбайнів не зафіксовано. Водночас на нових дисках після обробки 136...150 га виникла потреба у переточуванні ріжучих крайок через їх затуплення внаслідок зношування. Решта дослідних варіантів дисків не потребувала додаткового загострювання.

Середній показник експлуатаційного напрацювання дисків, відновлених різними методами, становив:

- 342 га у господарствах Чуднівського району;
- 334 га у господарствах Любарського району.

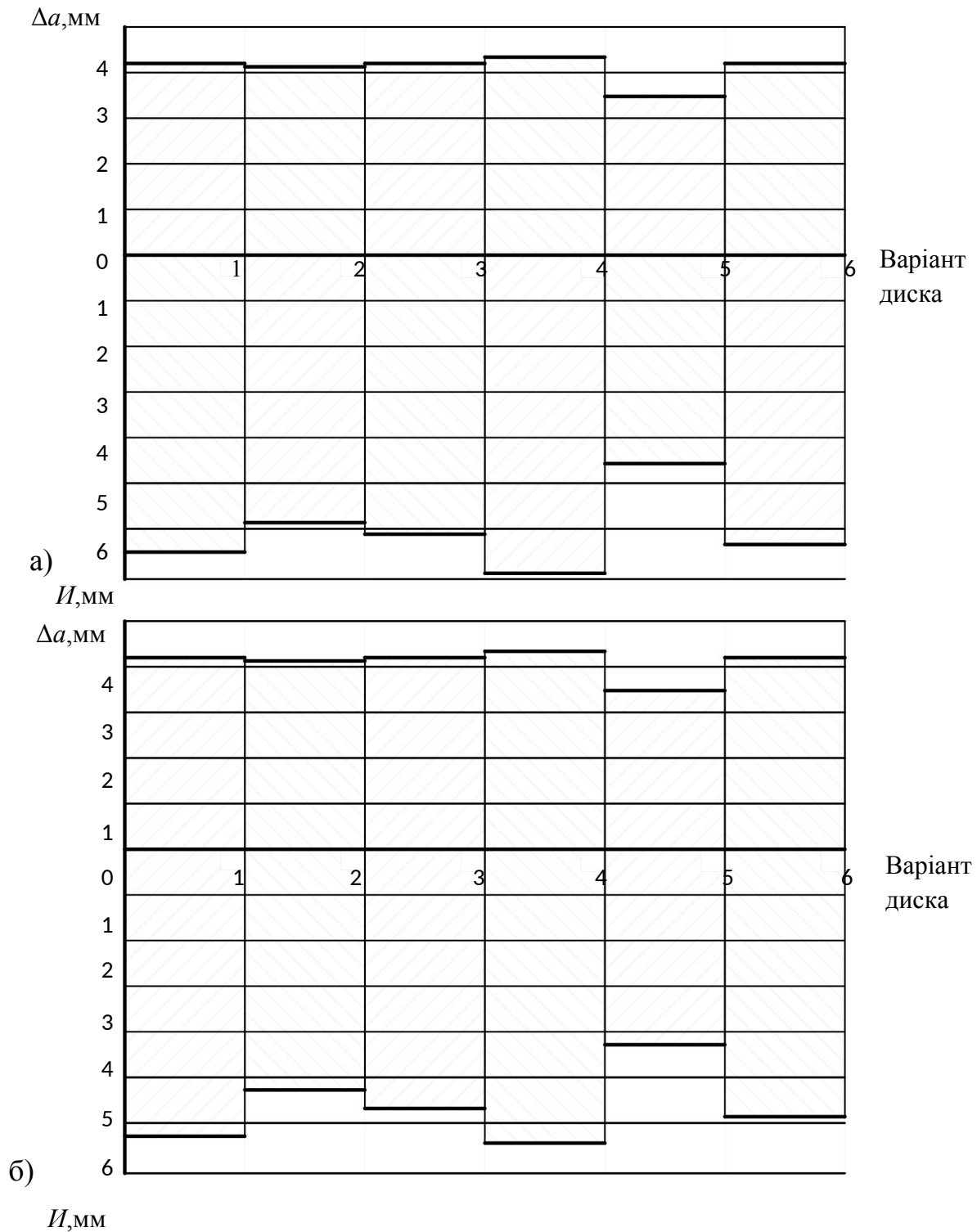


Рис. 3.3. Діаграми зміни радіального зносу диска (I) та приросту товщини ріжучої крайки (Δa) для активних (а) і пасивних (б) дисків: 1 – нові диски зі сталі 65Г; 2 – диски, відновлені приварюванням шин зі сталі 45 з подальшим автоматичним наплавленням сормайттом; 3 – диски, відновлені приварюванням шин зі сталі 10 та автоматичним наплавленням сормайтту; 4 – диски, відновлені

приварюванням шин зі сталі 45 з вібродуговим наплавленням сплавом X12; 5 – диски, відновлені приварюванням шин зі сталі 45, автоматично наплавлені сормайтотом і додатково зміцнені вібраційним деформуванням; 6 – нові диски зі сталі 65Г із привареними ребрами на пасивні елементи.

Найменше напрацювання 301 гамало місце у дисків, відновлених приварюванням сегментних шин зі сталі 45 із наступним вібродуговим наплавленням сплавом X12. Найвищий показник 399 га зафіксовано для дисків, відновлених приварюванням шин зі сталі 45, наплавлених сормайтотом та додатково зміцнених вібраційним деформуванням.

Загалом встановлено, що застосування вібраційного зміцнення дозволило збільшити напрацювання дисків у 1,32 раза порівняно з новими виробами.

Контроль зношування дисків здійснювали через кожні 60 га зібраної площі (додаток Д). Узагальнені результати експлуатаційних випробувань подано на рис. 3.3.

Результати експлуатаційних досліджень повністю підтвердили закономірності, встановлені під час стендових випробувань. В обох типах оцінювання найвищу надійність продемонстрували диски, відновлені приварюванням сегментних шин зі сталі 45, автоматично наплавлені сормайтотом і додатково зміцнені методом вібраційного деформування.

Показники ресурсу та інтенсивності зношування дисків, відновлених шинами зі сталі 45 і сталі 10 з подальшим автоматичним наплавленням сормайтоту, виявили певні відмінності. Радіальний знос ріжучої крайки активних дисків становив відповідно 5,92 і 6,15 мм, тоді як у пасивних дисків — 5,37 і 5,66 мм. Питомий знос на 1 га зібраної площі становив для активних дисків 0,017 і 0,018 мм/га, а для пасивних — 0,015 і 0,016 мм/га відповідно.

За обробки 300 га швидкість радіального зношування активних дисків першого та п'ятого варіантів дорівнювала 0,020 і 0,014 мм/га, тоді як зношування ріжучої кромки становило 0,014 і 0,011 мм/га відповідно.

Перевага дисків, відновлених сегментними шинами зі сталі 45 порівняно з аналогами зі сталі 10, зумовлена кращими механічними властивостями сталі 45. Тому для ремонтного відновлення дисків копачів раціонально застосовувати саме шини, виготовлені з цієї сталі.

Під час експлуатації нові диски зі сталі 65Г (варіант 1), а також нові диски зі сталі 65Г з привареними ребрами на пасивні елементи (варіант 6), потребували одноразового загострювання. Цю операцію виконували після обробки відповідно 136 і 150 га. Водночас диски інших варіантів протягом всього сезону загострювання не потребували.

Результати експлуатаційних випробувань повністю узгоджуються з даними стендових досліджень, що підтверджує їхню достовірність.

Статистичну обробку отриманих даних виконували з використанням ЕОМ Pentium IV.

3.5. Оцінювання надійності роботи дисків копачів картоплезбиральних машин

Надійність роботи дискових копачів визначають за кількома ключовими експлуатаційними показниками: рівнем викопуваності коренеплодів (особливо за умов сухого або підмерзлого ґрунту), ступенем їх пошкодження [5], напрацюванням за сезон до моменту необхідності переагострювання, а також коефіцієнтом технічного використання (КТВ) картоплезбиральних комбайнів. Саме величина викопуваності та значення КТВ є основними індикаторами працездатності техніки, тобто її надійності.

Під час роботи дискові ножі руйнують ґрунтовий прошарок навколо коренеплоду та створюють витягувальне зусилля, необхідне для його подальшого відокремлення. Ефективність цього процесу залежить від ступеня розпушення ґрунту у зоні розташування кореня, що визначається параметрами ріжучих і розпушувальних поверхонь дисків, матеріалом ножів, а також

частотою обертання активного та пасивного диска. Від інтенсивності розпушення ґрунту залежать якість сепарації, величина втрат та рівень травмування бульб.

Диски копача встановлюються під певними кутами до вертикальної площини та напрямку руху машини (кут розвалу), таким чином, щоб передні кромки були рознесені, а задні — зближені. Активний диск обертається примусово з кутовою швидкістю ω , тоді як пасивний — вільно.

Згідно з вимогами до картоплезбиральних машин, вони повинні забезпечувати вилучення з ґрунту не менше 98,5% коренеплодів; допустимий показник значно пошкоджених бульб — не більше 5–8% [2].

Результати експлуатаційних досліджень засвідчили, що найменші втрати бульб — 3,5% невикопаних та 3,9% пошкоджених — забезпечили два варіанти дисків:

- відновлені приварюванням шин зі сталі 45 з автоматичним наплавленням сормайтотом і зміцнені вібраційним деформуванням (варіант 5);
- нові диски зі сталі 65Г із привареними ребрами жорсткості на пасивний диск (варіант 6) (рис. 5.3).

Підвищення загальної ефективності роботи цих варіантів при однакових кутах

Вібраційний ефект ребер на пасивному диску. Приварені виступи зменшують його деформацію під час руху в ґрунті та водночас створюють вібраційний ефект. Це підсилює руйнування внутрішніх ґрунтових зв'язків та зв'язків ґрунт–бульба забезпечуючи інтенсивніше розтирання ущільненого шару та кращу сепарацію і очищення бульб.

Максимальна сепарація ґрунту. Найвищу ефективність сепарації забезпечує співвідношення різниці великого і малого радіусів обода до висоти сферичного пояса в межах 3,4...3,9.

Застосування дисків, відновлених за розробленою технологією, а також дисків із привареними ребрами на пасивному елементі підвищує їх

зносостійкість на 50...81% порівняно з новими. Крім того, втрати та пошкодження бульб зменшуються на 28% завдяки вібраційному ефекту та активнішому руйнуванню зв'язків у ґрунті.

Це підвищує технічну і технологічну надійність не лише дискового копача, а й усього картоплезбирального комбайна.

Надійність дисків також можна оцінювати за показником напрацювання на одиницю зносу ріжучої крайки. Максимальне значення 86,2 га/мм мали диски, відновлені за запропонованою технологією. Мінімальний показник 43,8 га/мм – зафіксований у дисків, відновлених приварюванням шин зі сталі 45 з вібродуговим наплавленням сплавом Х12. У нових дисків зі сталі 65Г цей показник становив 49,2 га/мм, тобто у 1,75 раза менше, ніж у дисків, відновлених за новою технологією.

Висновки по розділу

Проведено всебічний аналіз експлуатаційної довговічності дисків копачів, що працюють у складі картоплезбиральних машин. Порівняльні дослідження підтвердили, що застосування розробленої технології відновлення з використанням вібраційного зміцнення дає змогу знизити швидкість радіального зношування активних дисків у 1,81 раза, а ступінь затуплення їхніх ріжучих крайок — у 1,51 раза порівняно з новими деталями. При цьому характер зношування відновлених дисків практично збігається з поведінкою нових робочих органів.

Надійність функціонування дисків копачів картоплезбиральних комбайнів оцінювали за двома ключовими показниками – рівнем викопуваності бульб та коефіцієнтом технічного використання. Установлено, що комбайни, оснащені дисками, виготовленими або відновленими за запропонованою технологією, демонстрували на 28% менший відсоток невикопаних і пошкоджених бульб, ніж техніка з новими стандартними дисками. Крім того, коефіцієнт технічного

використання комбайнів із відновленими за новою технологією дисками був на 6% вищим, ніж у машин, оснащених новими робочими органами.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Проведений аналіз наявних наукових досліджень засвідчив, що надійність картоплезбиральних машин значною мірою залежить від інтенсивності зношування дискових копачів. Підвищення надійності роботи техніки досягається завдяки застосуванню нових конструкцій пасивних дисків із привареними ребрами жорсткості, що зменшують втрати бульб, а також використанню вібраційного зміцнення ріжучих крайок ножів, яке забезпечує підвищену зносостійкість.

Отримані в результаті експлуатаційних досліджень результати ь повністю узгоджуються з даними стендових тестів. Надійність дисків оцінювали за величиною напрацювання, що припадає на одиницю радіального зносу ріжучої крайки. Максимальний показник 86,2 га/мм продемонстрували диски, відновлені відповідно до розробленої технології. Найнижчий результат 43,8 га/мм отримано для дисків, відновлених приварюванням шин зі сталі 45 та вібродуговим наплавленням сплаву X12. Нові диски зі сталі 65Г мали показник 49,2 га/мм, що в 1,75 раза менше, ніж у дисків, відновлених за запропонованою технологічною схемою.

Запропонований вдосконалений варіант пасивного диска з ребрами жорсткості забезпечує підвищення відсотка викопуваності та зниження травмування бульб на 28%, що робить його ефективним засобом підвищення технологічної надійності картоплезбиральних машин.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Борак К. В. Халімовський С. А. Методи підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин. Synergetics, Fractals and New Technologies II International Scientific and Practical Conference, Zhytomyr, Ukraine, June 4-5, 2025. P. 48-53.
2. Куликівський В.Л., Бистрицький Б.П., Сенчило М.В., Халімовський С.А. Методи підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. *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. 243-250.
3. Байбула А., Халімовський С., Ковальчук Д. Триботехнічні процеси на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин. *Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості: збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції* (м. Кам'янець-Подільський, 16 жовтня 2025 року). Кам'янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. С. 55-63.
4. Войтюк Д.Г., Гаврилюк Г.Р. Сільськогосподарські машини. Київ : Урожай, 1994. 346 с.
5. Гаврилюк Г.Р., Войтюк Д.Г. Машини для збирання коренеплодів. Київ : Урожай, 1989. 240 с.
6. Грицик В.В., Яицький Б.П. Машини для збирання картоплі. Київ : Вища школа, 1983. 228 с.
7. Кравчук І.В. Картоплезбиральні машини: конструкція, розрахунок, налаштування. Львів : НУ «Львівська політехніка», 2008. 312 с.
8. Бровко М.Ф. Сільськогосподарські машини. Картоплезбиральна техніка. Харків : Основа, 2002. 214 с.

9. Сільськогосподарські машини: підручник / за ред. В.П. Гуріна. Київ : КНЕУ, 2010. 598 с.
10. Паньків М., Паньків Ю., Паньків В. Оптимізація параметрів робочих органів очисника вороху коренеплодів. *Вісник Тернопільського національного технічного університету.*, 2024. №4(116). С. 38–49.
11. Гевко Р.Б., Гевко І.Б. Дослідження ефективності робочих органів машин для збирання коренеплодів. *Подільський вісник технічних наук.*, 2016. №2. С. 112–121.
12. Грушецький С. Механізація процесів збирання картоплі: сучасний стан та перспективи. *ISG-Journal. Industrial Engineering and Automation.*, 2024. №1. С. 55–63.
13. Іванишин В.В. Моделювання структурних схем робочих органів картоплезбиральних машин. *Подільський вісник технічних наук.*, 2022. №1. С. 89–98.
14. Liu C., Chen Y., Zhou W., Qi Y. Design and optimization of a lightweight self-propelled potato combine harvester. *Agronomy.* 2024. Vol. 15. No. 1. P. 1–15.
15. Zhou J., Yang X., Li X. Design and experimental study of a crawler-type potato harvester. *INMATEH Agricultural Engineering.* 2020. Vol. 62. No. 2. P. 49–60.
16. Hevko R., Maruschak P., Prokopets H. Development and investigation of a root crop and potato cleaning system. *Engineering Science.* 2016. Vol. 3. P. 45–54.
17. Lyashenko S.V. The modern mechanization of potato cultivation and harvesting. *Scientific Herald of Poltava State Agrarian Academy.* 2013. No. 4. P. 112–118.
18. Baranovsky V.M. Structural and technological principles of combined transport-cleaning working bodies of root-harvesting machines. *Agricultural Engineering Research Journal.* 2005. Vol. 21. P. 77–84.
19. Fu Y., Zhang H., Li J. Design and simulation of the digging device of a small potato harvester. *International Journal of Agricultural Engineering.* 2023. Vol. 10. No. 2. P. 121–130.

20. Smith R., Burton K. Potato harvesting equipment design: A review. *Biosystems Engineering*. 2019. Vol. 178. P. 65–82.
21. Johnson P., Edwards D. Soil–crop interaction during potato harvesting: effects on working bodies. *Journal of Terramechanics*. 2020. Vol. 87. P. 15–25.
22. Brown L., Thomson A. Performance analysis of digging and separating modules in potato harvesters. *Applied Engineering in Agriculture*. 2017. Vol. 33. No. 4. P. 421–430.
23. Anderson R. Modern potato harvester separators and cleaning systems. *Agricultural Machinery Review*. 2021. Vol. 11. P. 98–109.
24. Miller J., Stevenson K. Structural improvements in potato harvester digging units. *International Agricultural Engineering Journal*. 2018. Vol. 27. No. 3. P. 43–52.
25. Carter M. Soil adhesion and wear of potato harvester working bodies. *Wear*. 2016. Vol. 368. P. 25–33.
26. Wilson P., Harvey T. Evaluation of new cleaning rollers for potato harvesters. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2022. Vol. 14. No. 2. P. 55–63.
27. Adams R., Miles J. Optimization of haulm separation devices in potato harvesters. *Biosystems Engineering*. 2022. Vol. 215. P. 124–133.
28. Jenkins R., Howard D. Vibratory digging units for potato harvesting: design and testing. *Journal of Agricultural Machinery Science*. 2023. Vol. 19. No. 1. P. 9–18.