

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

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Білоцький Олександр Васильович

УДК 631.3:621.825:621.79

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ РЕМОНТУ ТА
ВІДНОВЛЕННЯ КАРДАННИХ ВАЛІВ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ 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

_____ Білоцький О.В.

Керівник роботи

Дерев'янка Д.А.

доктор технічних наук, професор

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Білоцький Олександр Васильович. Удосконалення технології ремонту та відновлення карданних валів сільськогосподарських машин. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

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

Магістерська робота присвячена обґрунтуванню та експериментальній перевірці ефективності електромеханічного поверхневого загартування як способу підвищення зносостійкості шліців карданних валів сільськогосподарських машин. У роботі виконано аналіз сучасних методів зміцнення деталей машин, визначено їхні переваги та обмеження, а також доведено доцільність застосування електромеханічної обробки для зміцнення шліцьових з'єднань.

Експериментальними дослідженнями встановлено закономірності формування зміцненого поверхневого шару, розподілу мікротвердості по глибині та вздовж поверхні, а також вплив перекриття зон загартування на структурний стан матеріалу. Доведено, що електромеханічне поверхневе загартування забезпечує зростання мікротвердості сталей у 2,6–3,6 рази та суттєве підвищення зносостійкості шліців карданних валів. Обґрунтовано доцільність застосування сталі У8 для виготовлення та зміцнення шліців карданних валів замість серійної сталі 45. Отримані результати можуть бути використані у виробництві та ремонтному обслуговуванні техніки агропромислового комплексу.

Ключові слова: карданний вал, шліцьові з'єднання, електромеханічне поверхневе загартування, електромеханічна обробка, зміцнення поверхні, мікротвердість, зносостійкість, знос.

ANNOTATION

Bilotskyi Oleksandr Vasylovych. Improvement of the Technology for Repair and Restoration of Agricultural Machinery Cardan Shafts. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

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

The master's thesis is devoted to the substantiation and experimental verification of the effectiveness of electromechanical surface hardening as a method for increasing the wear resistance of spline joints of cardan shafts in agricultural machinery. The study includes an analysis of modern methods for strengthening machine parts, identifies their advantages and limitations, and substantiates the feasibility of applying electromechanical processing for strengthening spline connections.

Experimental investigations established the regularities of formation of the strengthened surface layer, the distribution of microhardness with depth and along the surface, as well as the influence of overlap of hardening zones on the structural state of the material. It was proved that electromechanical surface hardening ensures an increase in the microhardness of steels by 2.6–3.6 times and a significant improvement in the wear resistance of cardan shaft splines. The feasibility of using U8 steel for manufacturing and strengthening cardan shaft splines instead of the conventional 45 steel is substantiated. The obtained results can be applied in production and maintenance of equipment in the agro-industrial complex.

Keywords: cardan shaft, spline joints, electromechanical surface hardening, electromechanical processing, surface strengthening, microhardness, wear resistance, wear.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ШЛЯХИ ЇЇ РОЗВ'ЯЗАННЯ.....	11
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	27
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	43
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	55

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасний розвиток аграрного сектору України характеризується зростанням вимог до надійності, продуктивності та енергоефективності сільськогосподарських машин. У цих умовах особливого значення набуває технічний стан трансмісійних вузлів, зокрема карданних валів, які забезпечують передачу крутного моменту від енергетичного засобу до робочих органів машин і агрегатів. Карданні вали працюють у складних експлуатаційних умовах, що супроводжуються змінними та ударними навантаженнями, значними кутами зламу, підвищеною запиленістю, вологістю та агресивним впливом зовнішнього середовища. У результаті цього відбувається інтенсивний знос шліцьових з'єднань, вилок, посадкових місць підшипників, а також порушення балансування валів, що призводить до зниження ресурсу та виникнення аварійних відмов.

На практиці значна частина парку сільськогосподарської техніки експлуатується понад нормативні строки служби, а оновлення машинно-тракторного парку стримується високою вартістю нової техніки та запасних частин. За таких умов ремонт і відновлення карданних валів стають економічно доцільною та технічно необхідною альтернативою їх повній заміні. Водночас традиційні технології ремонту часто не забезпечують достатнього рівня надійності та довговічності відновлених деталей, що обумовлює потребу в їх подальшому вдосконаленні.

Особливо актуальним є впровадження прогресивних методів відновлення, зокрема наплавлення, напилення, поверхневого зміцнення та удосконалених способів механічної обробки, які дозволяють підвищити зносостійкість і втомну міцність елементів карданних валів. Разом із цим важливого значення набуває оптимізація технологічних режимів ремонту, вибір раціональних наплавочних матеріалів, забезпечення якісного балансування та дотримання вимог до геометричної точності відновлених вузлів. Недостатня науково обґрунтованість

цих процесів у багатьох ремонтних майстернях призводить до нестабільної якості ремонту та скорочення міжремонтного ресурсу.

Таким чином, удосконалення технології ремонту та відновлення карданних валів сільськогосподарських машин є актуальним науково-практичним завданням, спрямованим на підвищення надійності й довговічності трансмісійних систем, зниження експлуатаційних витрат та забезпечення сталого функціонування аграрного виробництва. Результати дослідження у цьому напрямі мають важливе значення як для ремонтно-обслуговуючих підприємств, так і для безпосередніх споживачів сільськогосподарської техніки, що підтверджує актуальність обраної теми магістерської роботи.

Метою магістерської роботи є підвищення зносостійкості шліців карданних валів сільськогосподарських машин шляхом удосконалення технології їх зміцнення методом електромеханічного поверхневого загартування та обґрунтування раціонального вибору матеріалу.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі завдання:

Провести аналіз сучасних методів зміцнення шліцевих з'єднань карданних валів та визначити їхні переваги і недоліки.

Обґрунтувати доцільність застосування електромеханічного поверхневого загартування для зміцнення шліців карданних валів.

Дослідити вплив електромеханічної обробки на мікротвердість і глибину зміцненого шару різних матеріалів.

Встановити закономірності формування повністю загартованих, частково загартованих зон і зон самовідпуску за умов перекриття проходів.

Оцінити зносостійкість зміцнених зразків у порівнянні з вихідним станом в умовах, що імітують роботу шліців карданних валів.

Обґрунтувати доцільність використання сталі У8 для виготовлення та зміцнення шліців карданних валів у порівнянні зі сталлю 45.

Об'єктом дослідження є процеси зношування та поверхневого зміцнення шліцьових з'єднань карданних валів сільськогосподарських машин.

Предметом дослідження є закономірності формування структури, мікротвердості та зносостійкості поверхневого шару шліців карданних валів у результаті електромеханічного поверхневого загартування.

Методи наукового дослідження. У процесі виконання магістерської роботи було використано комплекс загальнонаукових і спеціальних методів дослідження, а саме:

Аналіз і синтез – для узагальнення науково-технічної інформації щодо сучасних методів зміцнення шліцьових з'єднань карданних валів та формування висновків про доцільність застосування електромеханічного поверхневого загартування.

Порівняльний аналіз – для зіставлення показників мікротвердості та зносостійкості матеріалів у вихідному стані та після електромеханічного поверхневого загартування.

Експериментальні методи – для дослідження впливу електромеханічної обробки на властивості поверхневого шару шліців карданних валів у лабораторних умовах.

Методи вимірювання твердості та мікротвердості – з використанням переносних твердомірів і мікротвердомірів (методи HRC та HV) для визначення механічних властивостей зміцненого шару.

Металографічні методи дослідження – для аналізу мікроструктури поверхневих і перехідних зон з використанням оптичної та електронної мікроскопії.

Рентгенофазовий аналіз – для ідентифікації фазового складу та підтвердження утворення мартенситної структури в зоні електромеханічного загартування.

Зносостійкі випробування – для оцінки інтенсивності зношування поверхонь у парах тертя, що імітують умови експлуатації шліців карданних валів.

Фрактографічний аналіз – для дослідження характеру руйнування та зношування поверхневих шарів після випробувань.

Статистична обробка експериментальних даних – для підвищення достовірності результатів, визначення середніх значень і аналізу розсіювання вимірюваних параметрів..

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Борак К.В., Білоцький О.В., Торгонський В.С. Перспективи розвитку технічного сервісу МТП в АПК. Збірник тез доповідей XII Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання» з нагоди 118-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, віцепрезидента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906-1987) 20-21 лют. 2025 р., м. Київ / МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. К.: Видавничий центр НУБіП України, 2025. С. 61-62.

2. Борак К. В., Руденко В. Г., Грудовий Р. С., Гонгало А. Й., Білоцький О. В. Шляхи підвищення роботоздатності сільськогосподарських машин: аналіз технологій та рішень останнього десятиліття. Збірник тез доповідей XI Міжнародної науково-практичної конференції "Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь. PTDSTSAMT-2025" з нагоди 30-річчя започаткування підготовки ОС "Бакалавр" за спеціальністю "Агроінженерія" 11 квітня 2025 року МОН України. Житомирський агротехнічний фазовий коледж. Житомир. 2025. С. 51-59. [https:// doi.org/10.64165/proceeding-ptdstsamt.2025](https://doi.org/10.64165/proceeding-ptdstsamt.2025).

3. Федорчук А.О., Сумма Д.Я., Ясінський В.О., Білоцький О.В. Особливості технічного сервісу сільськогосподарських машин в Канаді. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі:

матеріали V Міжнар. наук.-практ. конференції молодих учених (Запоріжжя, 03-28 лютого 2025 р.). Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. С. 116-118.

Практичну інтерес. Результати магістерської роботи мають безпосередній практичний інтерес для аграрних підприємств, ремонтно-обслуговуючих підрозділів та сервісних центрів агропромислового комплексу, оскільки спрямовані на підвищення надійності та довговічності карданних передач сільськогосподарських машин.

Запропонована технологія електромеханічного поверхневого загартування шліців карданних валів дозволяє істотно підвищити їх зносостійкість без необхідності застосування складного термічного обладнання. Це забезпечує можливість впровадження технології безпосередньо в умовах ремонтних майстерень аграрних підприємств, у тому числі з обмеженою виробничою базою. Простота реалізації, універсальність обладнання та низька енергоємність процесу знижують витрати на ремонт і відновлення деталей.

Практичним результатом упровадження розроблених рішень є збільшення ресурсу шліцевих з'єднань карданних валів у 1,9–6,1 раза залежно від матеріалу, що дає змогу зменшити кількість відмов трансмісійних вузлів, скоротити простої техніки в напружені періоди польових робіт і підвищити коефіцієнт технічної готовності машинно-тракторного парку.

Використання шліців зі сталі У8 після електромеханічного зміцнення замість серійних шліців зі сталі 45 дозволяє аграрним підприємствам оптимізувати матеріальний склад деталей, знизити витрати на закупівлю запасних частин та підвищити ефективність ремонтних робіт. Це особливо важливо для техніки, що працює в умовах підвищеного пилового навантаження, вологи та змінних динамічних навантажень.

Отримані в роботі науково-практичні результати можуть бути використані під час розроблення регламентів технічного обслуговування та ремонту карданних передач, а також при модернізації технологічних процесів відновлення деталей у ремонтних підприємствах агропромислового комплексу.

Застосування запропонованих рішень сприятиме підвищенню економічної ефективності виробництва, зниженню експлуатаційних витрат і забезпеченню стабільної роботи сільськогосподарської техніки.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 25 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 56 сторінок комп'ютерного тексту, містить 27 рисунків та 2 таблиці.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ШЛЯХИ ЇЇ РОЗВ'ЯЗАННЯ

1.1. Особливості конструкції карданних передач та їх елементів

Карданна передача (також універсальний шарнір, шарнір Гука) – це просторовий шарнірний механізм, що складається з центральної хрестовини та двох прикріплених вилок на кінцях валів. Вона призначена для передачі крутного моменту між валами, осі яких можуть бути відхилені один від одного під значним кутом (до 40–45°). У сільськогосподарській техніці карданні передачі використовуються для з'єднання виходу ВВП трактора з приводами навісного або причіпного обладнання, а також для передання обертання від роздавальної коробки на мости тракторів. Для передавання крутного моменту між вузлами трансмісії, розташованими на значній відстані, застосовують карданну передачу, яка може компенсувати невелику невісність валів.

Історичний огляд розвитку карданних передач

Основна концепція універсального шарніра відома ще з античності: ймовірно, універсальний шарнір використовували у баллистах Стародавньої Греції. Першою ідеєю використати такий шарнір для передачі рушійної сили висловив італійський математик Джироламо Кардано у 1545 р.. Винахід Кардано на довгі століття закарбував назву «карданний шарнір» у Європі. У XVII ст. швед Крістофер Польхем заново винайшов цей механізм (у Швеції його й називають «Polhemsknut»). Далі механізм описали у праці Гаспара Шотта (1664), де він помилково вважав його шарнір сталою швидкість обертання. Проте Роберт Гук у 1670-х рр. проаналізував шарнір і виявив, що його вихідна частина обертається нерівномірно (змінює швидкість). Саме Гук дав назву «універсальний шарнір» (1676), що в англійському світі призвело до вживання терміна «Hooke's joint». У XVIII–XIX ст. універсальні шарніри знайшли широке застосування на млинах та в промислових приводах. Локомотив Ефріама Шея (1881 р.) містив подвійні шарніри для передачі крутного моменту у трансмісії.

Вітається також, що винахідники у 1683 р. запропонували подвійний шарнір (два універсальні шарніри на одному валу під 90°), що є праобразом синхронних шарнірів рівних кутових швидкостей.

Карданна передача забезпечує передачу обертання між валами з різним положенням осей, при цьому компенсуються коливання і невісності. За конструкцією це механізм із подвійного шарніра. Компоненти карданної передачі (серія тракторних трансмісій) зображено на схемі: жовтий пластмасовий кожух ВВП на переходнику, хрестовина універсального шарніра, вилки та втулки (рис. 1).

КАРДАННА ПЕРЕДАЧА ПРИВОДУ МОСТІВ ТРАКТОРА Т-150К

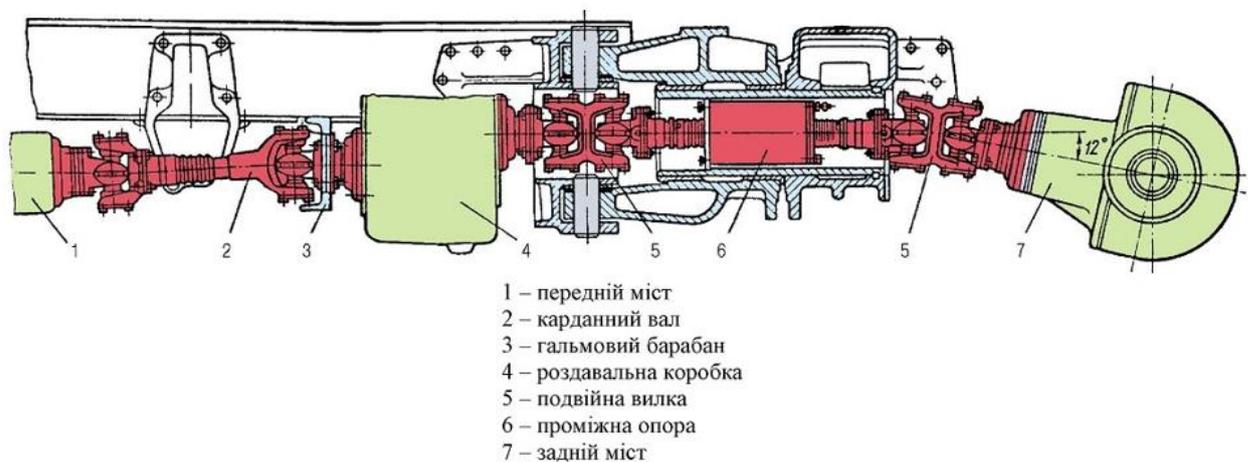


Рис. 1.1. Схема карданної передачі трактора Т-150К.

Обертання від роздавальної коробки передається через карданний вал 2 на передній міст 1; на задній міст 7 крутний момент передається через дві подвійні вилки 5 та проміжну опору 6.

У типовому карданному шарнірі вал-ядро (хрестовина) з двома проекційними осями з'єднує два U-подібні кріплення (вилки-півмуфти). Кожна вилка охоплює одну вісь хрестовини за допомогою набору голчастих підшипників та ущільнень. Принцип роботи: коли вали знаходяться під кутом, хрестовина передає крутний момент, але при цьому кут швидкість вихідного вала змінюється протягом оберту. Одного одинарного шарніра недостатньо для синхронного обертання на всіх кутах; тому для збереження сталої швидкості між двома валах використовують пару шарнірів (двухступеневий кардан) або

застосовують дорогі синхронні шарніри. В класичному тракторному приводі зазвичай достатньо одного карданного шарніра на кожному кінці вала.

Основні деталі карданного валу включають: трубчастий порожнистий вал, вилки (півмуфти) з фланцями, конічні або плоскі вилкоподібні муфти, хрестовину (ядро) зі шпильовими підшипниками, а також шліцьові або телескопічні з'єднання для регулювання довжини валу. Зазвичай карданний вал накрито захисним пластиковим кожухом по всій довжині. На виході трактора встановлюють фланцеву вилку (вилка ВВП); на іншому кінці – вилку причіпного обладнання або ступичний фланець машини. Для компенсації рухів і різної відстані застосовують телескопічні або шліцьові з'єднання: наприклад, втулка з шліцами жорстко закріплена на одній вилці, а на іншій вилці має шліци порожнистий хвостовик вала 6 (рис. 1.2). Під час роботи одна частина вала вільно переміщується всередині шліцьової втулки, забезпечуючи зміну довжини трансмісії.

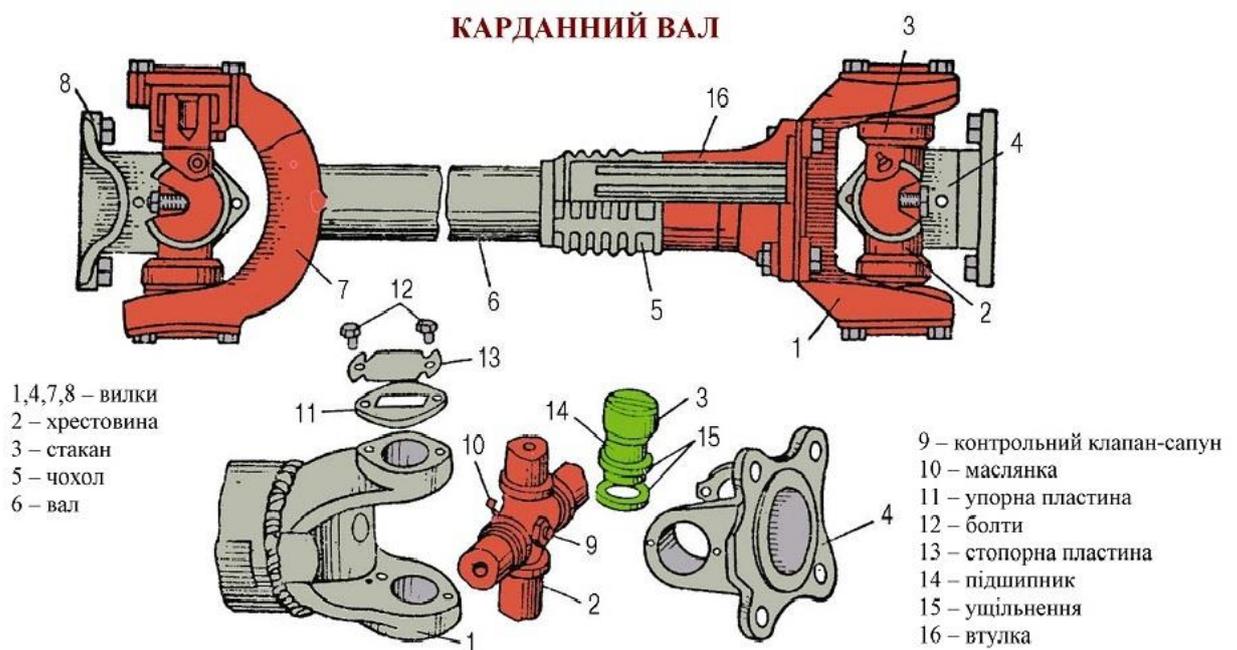


Рис. 1.2. Типова конструкція карданного валу з хрестовиною 2 та вилками 1, 4, 7, 8; голчастими підшипниками 14; телескопічним шліцьовим з'єднанням 6–16; захисним кожухом 5 та фіксатором 10.

Як видно, головними елементами є хрестовина та з'єднувальні півмуфти; роликові або голчасті підшипники між корпусами вилок і осями хрестовини забезпечують обертання без значного заїдання.

Основні елементи карданної передачі

Карданний вал – трубчастий вал, що з'єднує два універсальні шарніри (рис. 1.2). Його конструкція дозволяє передавати момент і зміщуватися осьово. На кожному кінці вала є вилки (півмуфти) з отворами, що охоплюють кінці хрестовини. Карданний вал складається з таких компонентів:

- Вилка тракторного ВВП (Input Yoke) – кріпиться до виходу ВВП трактора;
- Хрестовина (Joint cross) – центральна скріпка, що передає оберти між двома вилками;
- Вилка навісного обладнання (Output Yoke) – з'єднується з редуктором робочого органа / обгінною муфтою;
- Телескопічний вузол (Sliding splined shaft) – забезпечує регулювання довжини вала для компенсації рухів обладнання;
- Захисний кожух (PTO shield) – жорсткий пластиковий кожух по всій довжині валу для безпеки користувача;
- Фіксатори (Chains/Clamps) – металеві ланцюги або фіксатори на кінцях кожуха, що запобігають обертанню кожуха з валом.

У зібраному стані голчасті підшипники (втулки) фіксуються упорними та стопорними пластинами, які надійно утримують хрестовину всередині вилок. Після виготовлення кожен карданний вал динамічно балансують спеціальними балансувальними пластинами під болтами кришок підшипників, що усуває вібрації при роботі. При змащуванні в картері кожного шарніру є клапан перепуску масла, який виштовхує зайве мастило та повітря. Зі шприца через маслянку мастило надходить по каналах в обойми підшипників і частково надлишок через цей клапан витікає, що захищає манжети від надлишкового тиску й продовжує їх ресурс.

Кожен універсальний шарнір карданної передачі складається з двох вилок і центральної хрестовини, що скріплена болтовими втулками та підшипниками. Шарнірна вилка має два отвори, у яких розміщується ролик (голчаста) підшипникова обойма, що взаємодіє з одним квадратним вильотом хрестовини. Принцип роботи шарніра: при невеликому куті (приблизно до 22° – таке конструктивне обмеження) обидвівилки передають обертання досить рівномірно. Однак при значних кутах (30° – 45°) вихідний вал обертається з нерівномірною кутовою швидкістю – цей ефект називають несинхронністю. Роберт Гук у XVII ст. показав, що один шарнір призводить до періодичної пульсації швидкості; тому для повного вирівнювання зазвичай застосовують два шарніри під 90° один до одного (це властивість використовують, наприклад, у карданних валах з подвійним шарніром).

Захист приводу від перевантаження здійснюється за допомогою запобіжних муфт (автоматичних зчеплень), розташованих на карданному валу або біля приводу валу навісного обладнання. Існує кілька типів запобіжних муфт: фрикційні, обгінні (односпрямовані) та зрізні (штифтові). Зокрема, фрикційні (тертя) муфти забезпечують плавне проковзування при перевантаженні з автоматичним повторним включенням після зниження навантаження; вони використовуються у великих пресах чи жатках для захисту від різких ударів. Односпрямовані обгінні муфти (sprag-клутчі) допускають передачу крутного моменту в одному напрямі тільки (не забезпечують захист від перевантаження, але захищають привід від гальмівного навантаження при обертанні мас). Зрізні штифтові муфти повністю розривають передавання крутного моменту при досягненні певного зусилля (при перевантаженні штифт ідеально обломлюється); такий захист застосовується у насосах, міксерах, дешевих пресах (після спрацювання штифт доводиться замінювати). Існують також радіальні пінові муфти, що розривають передавання з відскоком, дозволяючи вільно повертати вал обладнання при перевантаженні.

Захисні кожухи і фіксатори – обов’язкові елементи карданної передачі. Захисний пластиковий кожух (зазвичай яскраво-жовтий) накриває всі рухомі частини валу і шарнірів, запобігаючи травмам оператора (наприклад, потраплянню одягу чи кінцівок у вал). Кожух також захищає деталі кардана від пилу та вологи. Закріплюють кожух ланцюжками або спеціальними фіксаторами на обох кінцях, щоб він не обертався разом з валом. Наприклад, в описі фото карданного валу зауважується, що «жовтий пластиковий кожух кріпиться ланцюгами або мотузками з обох кінців, щоб не обертатися разом із валом, що є пристроєм безпеки». Експлуатація карданного валу без надійного захисного кожуха чи при пошкодженому кожусі категорично заборонена. У документації виробників зазначено, що використання валу ВВП без кожуха або з ненадійним кріпленням може призвести до смертельних травм, і тому має застосовуватися тільки оригінальна система фіксації кожуха.

Провідні виробники тракторів та навісного обладнання (John Deere, CLAAS, New Holland/Case IH, Fendt, Amazone, Kuhn тощо) впроваджують у власні карданні приводи ряд інновацій. Зокрема, John Deere використовує універсальні телескопічні шарніри в приводі ВВП: наприклад, шарнір RE23966 забезпечує передачу потужності між трансмісією та РТО-валом із телескопічним подовжувачем, виготовлений із високоміцної сталі для довговічності. Телескопічні вали компенсують осьові зсуви через роботу трактора по нерівній поверхні і дозволяють експлуатувати широкий спектр навісних машин.

Компанії Walterscheid (Agri Drives) та ZF AGCO (Spicer) пропонують готові карданні вали з подвійними ширококутними шарнірами (тип PowerDrive), пристосовані для великих тракторів з великою розбіжністю кутів. Наприклад, Walterscheid випускає вали серії PowerDrive PWZ з двома ширококутними шарнірами (до 75°) для випадків великих кутових навантажень; при цьому рекомендується підтримувати постійний кут не більше 20°. У таких конструкціях інновацією є профільовані, товстостінні захисні кожухи: вони перешкоджають взаємному провороту половин кожуха, тому ланцюжки

фіксатора з тракторної сторони вже не потрібні. У версії «повного захисту» від ланцюгів взагалі відмовляються, знижуючи ризик пошкодження кожуха через неправильно встановлені ланцюги. Також PowerDrive-серія оснащена багатокромковими герметизуючими кільцями та спеціальними матеріалами для валів: це мінімізує втрати мастила і тертя, що дозволяє збільшити інтервали обслуговування.

Крім того, впроваджуються швидкознімні з'єднувачі (Quick-disconnect) для швидкого приєднання/від'єднання ВВП, електрогідравлічні муфти вмикання РТО (дозволяють вмикати ВВП без механічних важелів), а також модернізовані запобіжні муфти з плаваючими фрикційними елементами (щоб гасити пікові удари). Практично всі сучасні трактори комплектуються стандартними шліцевими входами ВВП (6-шліцевим 1 3/4", 8-шліцевим або 1 3/8" на 21 шліц в залежності від моделі). Легке навісне обладнання (косарки, розкидачі, борони тощо) найчастіше поставляється з карданними валами від тих самих спеціалістів (Walterscheid, GKN), що мають вбудовані фрикційні та обгінні муфти. Наприклад, вал привода розкидача Amazone чи жатки Kuhn зазвичай містить як обгінну, так і пружинно-фрикційну муфту, щоб захистити привід і обертові ріжучі елементи.

У сільськогосподарських умовах карданна передача повинна бути надзвичайно надійною і витривалою. Для цього застосовуються лише стійкі до навантажень матеріали та точні виготовлені компоненти. Балансування валу є критичним: під час виробництва знімні болти та балансувальні пластини підбираються так, щоб вал не вібрував при номінальних обертах. Небалансований вал швидко виходить з ладу (струсується вилками, руйнуються підшипники, деформуються шліци), тому балансувальні роботи проводять після кожного виготовлення.

Технічне обслуговування передбачає регулярне змащення шарнірів та перевірку стану захисних елементів. Як правило, в корпусі кожного шарніра є маслянка для нагнітання консистентного мастила, а спеціальний клапан видаляє

старе мастило і повітря при заправці. Після певної відпрацьованої мотогодини (наприклад, 250–300 мотогод.) мастило в шарнірах оновлюють повністю. Виробники вимагають використовувати оригінальні змащувальні матеріали і не модифікувати конструкцію вала (окрім налаштування довжини).

Обов'язкові також регулярні перевірки ободів вилок, шліців та кріпильних болтів: при наявності люфтів чи тріщин деталі замінюють. До того ж важливо не перевантажувати карданну передачу понад номінальне: у технічній документації вказується, що вали ВВП слід підбирати за потужністю і обертовим моментом трактора; перевантаження може призвести до пошкодження устаткування. Наприклад, передавальний вал 540 об/хв має встановлене максимальне крутне навантаження; перевищення оборотів або моменту спричинить втрату зчеплення в запобіжній муфті або поломку шліців.

Сучасні технології також передбачають максимальний захист: наприклад, система PowerDrive обладнана багатокромковими ущільнювальними манжетами, які майже повністю утримують мастило і захищають підшипники від забруднень. Такі заходи значно знижують необхідність частого обслуговування та продовжують ресурс вала. У цілому, щоб карданний вал працював тривалий час, необхідні акуратне зчеплення, нормальний режим навантаження та регулярна профілактика всіх згаданих елементів.

Карданна передача залишається незамінним компонентом аграрної техніки, забезпечуючи надійну передачу крутного моменту між розташованими на відстані або під кутом вузлами. Її історичний розвиток (від ідей Кардано до сучасних рішень) показує, що ця конструкція постійно вдосконалюється для більшої надійності і безпеки. Сучасні трактори та агрегати комплектуються високоякісними карданними валами з телескопічними вузлами, системами безпечних муфт та продуманими захисними кожухами, а також застосовують строгі вимоги до монтажу та технічного обслуговування. Дотримання цих вимог гарантує довготривалу і безпечну експлуатацію карданної передачі в суворих умовах аграрного виробництва.

1.2. Основні напрямки підвищення надійності карданних передач та їх утримання

Конструкція стандартного карданного вала включає універсальні шарніри (крестовини), телескопічні труби і захисні ковпаки. При цьому основні несправності найчастіше спричиняють саме зноси та поломки рухомих вузлів передачі. Типовими симптомами аварійного стану карданної передачі є: сильні вібрації в нижній частині машини при русі, сторонні стуки чи скрежет у вузлах, а також вібрація тягового з'єднання. Нерівномірне розподілення ваги та дисбаланс кардана, інтенсивний знос голчастих підшипників в шарнірах і протиджотна корозія шліцьових з'єднань призводять до появи таких симптомів, як глухий стук чи «грюкіт» під час обертання вала. Зокрема, при значному зношенні внутрішніх шліців карданного вала та голчастих підшипників шарнірів обертання починає ускладнюватися, що одразу супроводжується характерним вібраційним ефектом і шумом. Недостатнє або неякісне змащення – ще одна поширена причина передчасних відмов: без регулярного введення свіжого мастила втулки і підшипники швидко «задубівають», що підвищує температуру обертання і викликає вигорання залишків мастила.

За результатами досліджень встановлено, що підшипникові вузли (голчасті підшипники) універсальних шарнірів є найбільш критичними елементами карданного вала й основною причиною низької надійності передач. Випробування показали, що саме другий (від двигуна) шарнір найчастіше виходить з ладу першим. Недостатній рівень технічного обслуговування (насамперед – змащення кожні 8 годин роботи) спричиняє прискорене руйнування підшипників і втрату герметизації. У польових випробуваннях середній ресурс валів виявився у 2,2 рази меншим, ніж в лабораторії. Таким чином, у складних аграрних умовах травматичні механічні навантаження, пилова абразивна дія, висока вологість і нерегулярне обслуговування значно знижують надійність карданного приводу.

Існує багато шляхів конструктивного вдосконалення карданних передач для агромашин. Використання додаткових шарнірів і опор. Для довгих карданних валів, уникаючи небезпечних флаттерів, часто застосовують проміжну опору або два подвійні шарніри. Проміжна опора сприймає вигинальні навантаження і знижує критичні частоти резонансу. У таких конструкціях передача крутного моменту здійснюється через нерухоме шліцьове з'єднання між валами і фланцем, яке, як правило, стає елементом, що «обмежує» міцність всієї передачі. За результатами вивчення трансмісій автомобілів МАЗ, була розроблена поліпшена конструкція шліцьового кінця з більшим ресурсом (зокрема, з полімерними покриттями). Хоч деталі цього рішення стосуються тягових перевезень, сам принцип – захист шліців гнучкими антизношувальними вставками – може бути застосований і в сільгосптехніці.

Подвійний кардан (гомокінематичний шарнір). Класичне вдосконалення – використання двох простих шарнірів замість одного. Комбінація двох шківовоїних шарнірів різних кутів дозволяє суттєво зменшити нерівномірність обертання та вібрації. Наприклад, як зазначено в стандарті ISO 5673, конфігурація з двома простими шарнірами компенсує різницю кутів і гарантує рівномірну передачу руху при невеликих кутах (коли кути приблизно рівні). У сільському господарстві також поширені конструкції з одним простим і одним шарніром рівних кутів, а для дуже складних умов – два рівновеликі гомокінематичні шарніри (так звана подвійна карданна передача), які забезпечують практично постійну кутову швидкість виходу навіть при великих відхиленнях до $\sim 40^\circ$. Подібні рішення знизять динамічну нерівномірність і зменшують навантаження на мастильні елементи.

Використання ширококутових шарнірів. Сучасні виробники випускають так звані ширококутові карданні вали, що можуть працювати під гострими кутами до 80° . Наприклад, широка лінійка Walterscheid W-series включає моделі WWZ та WZ з посиленими шарнірами, здатними передавати великий момент при великих кутових відхиленнях. Вони мають міцні вилки та більші сталеві

крестовини, що підвищує їхню довговічність. Перевагою ширококутових конструкцій є можливість виконувати маневри (наприклад, розвороти причіпного знаряддя) без значного підняття валу – при тому вихідна швидкість залишатиметься рівномірною. На рис. зображено один із сучасних карданних валів з ширококутними шарнірами від Walterscheid. За рахунок оптимізованих матеріалів (легованих сталей високої міцності) та точної балансування ця передача демонструє «довгий термін служби і високу надійність» – так описує W-серію безліч випробувань виробник. Крім того, всі компоненти таких валів (вилки, крестовини, труби) стандартизовані й замінюються, що спрощує ремонт та обслуговування.

Поліпшені матеріали та покриття. Іншою лінією покращень є застосування нових матеріалів і технологій обробки. Наприклад, поверхні шліців та підшипників можна покривати зносостійкими напиленнями або фосфатованим захистом, щоб зменшити корозію та тертя. Також використовують більш міцні сталі для крестовин та збільшують товщину вилок у місцях найбільшого навантаження. У низці досліджень пропонують додачу полімерних шліців карданого вала у голчасті підшипники, аби зменшити ударні навантаження на голки без заміни конструкції крестовини. Хоча безпосереднього прикладу з агросектора з подібними рішеннями знайти важко, в цілому технології поверхневого зміцнення (закалка, напилення) є загально прийнятими заходами підвищення ресурсу карданних передач.

Удосконалена герметизація і захист. Герметичність вузлів кардана критична для їх довговічності. Агротехніка працює у бруді та вологому середовищі, тому на заводах уже практикують встановлення на шарніри захисних гумових пильовиків і ущільнювачів, що перешкоджають затіканню пилу і вологи. Також поширені металеві «щитки» та кришки, що вкривають цілісність карданних вузлів, які не тільки охороняють від зовнішніх впливів, а й захищають оператора від випадкового контакту. Наприклад, вальтершайдська система захисту включає штампований металевий кожух (з двома конусними

ковпаками та ланцюжком) навколо кожного шарніра та телескопічної труби. Такі заходи суттєво підвищують безпеку і також зменшують накопичення забруднень на рухомих частинах. Крім того, на деяких валах застосовуються сапуни та зворотні клапани у корпусах шарнірів, що дозволяють відводити нагріте повітря і надлишок мастила, одночасно не допускаючи пилу всередину.

Динамічне балансування. Зміна масових параметрів валів також критична для надійності. Будь-який карданний вал з некомпенсованим дисбалансом під час обертання створює додаткові вібрації, що збільшує коливальні навантаження на весь привід. Тому на виробництвах карданні вали проходять динамічне балансування на спеціальних стендах, і кожна крестовина перевіряється на збалансованість. В ідеалі центри ваг вилок і крестовини повинні співпадати, аби уникнути нерівномірного навантаження підшипників. Крім того, при складанні валу слід дотримуватися правил фазування вилок: сумісні вилок і труба повинні бути встановлені в одній фазі (тобто не розвернуті одна до одної), щоб усі шліцьові з'єднання перебували в одній площині. Суворе дотримання цієї процедури забезпечує мінімальні коливання в роботі карданної передачі.

Покращення систем подачі мастила є одним із найважливіших напрямків підвищення ресурсу карданів. В універсальних карданах змазка традиційно подається централізовано приголом через люки на крестовині і отвір у проміжній трубі. Фахівці наголошують, що правильна мастило повинна бути на основі літєвого мила з EP-добавками (консистенція NLGI 2), стійким до високих температур та води. Будь-яке «побічне» мастило – графітове або силіконове – забезпечує лише поверхневий захист і не вирішує проблему просочування в стиках. При нарощеній експлуатації (високі оберти, великі кути) завжди доцільно змащувати шарніри перед початком роботи, а в особливо важких умовах – через кожні 8–10 годин роботи (що підтверджує як виробник Walterscheid, так і практика фермерів). За недотримання регламенту мастила, при нагріванні до $\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ мастило згоряє або виливається, і передача «засихає» – досягаючи критичного стану.

Деякі нові конструкції пропонують автоматизовані системи змащення. Наприклад, застосування регуляторів тиску в трубках чи автономних pomp дозволяє періодично подавати мастило без участі оператора. Іншим рішенням є нанесення на вали самовідновних порошкових мастильних покриттів (як нитрид титану) – їх вплив поки що в стадії досліджень, але це може стати перспективою зменшення потреби в регулярній доливці.

Належне техобслуговування – ключ до довговічності карданних передач. Воно включає регулярний огляд, змащування та заміну зношених вузлів. Перш за все перевіряють люфт і знос шарнірів: вал повинен вільно обертатися, а биття на вході-виході бути мінімальним. При огляді помічають пошкодження шліців карданого вала та ущільнень, сліди корозії або втрати мастила, тріщини на фланцях і гвинтах. Розслаблені болти фіксації хомутів і вилок необхідно моментально затягувати – в протилежному разі вал набуває вібрацій через «грацієнт» стиків. Зношені крестовини і голчасті підшипники звичайно підлягають негайній заміні – ці деталі не ремонтуються, і їх перебіг спричиняє руйнування решти передачі. Балансування кардана після складальних або ремонтних робіт також обов'язкове: навіть невелике зміщення маси викликає коливання, які знижують ресурс підшипників та проміжних опор.

Згідно з дослідженнями Regler et al., у практиці фермерського обслуговування часто практикується два крайніх варіанти: або надмірна мастильна «підмазка» перед кожним запуском, або зовсім її ігнорують. У роботі показано, що оптимальна стратегія – дотримання регламенту виробника. Наприклад, моделювання сценаріїв техобслуговування валів (до/після використання або з цифровим графіком) демонструє, що слідування графіку за допомогою цифрового «асистента» може знизити витрати на обслуговування до 93,8% та скоротити використання мастила на 86,3% у порівнянні з надмірною мастилом. Таким чином, сучасні цифрові рішення (телеметричні додатки та системи віддаленого моніторингу) дозволяють планувати графік заміни мастил і

попереджати про необхідність обслуговування – що, у свою чергу, подовжує строк безвідмовної роботи карданного вала.

Висновки експерименту Regler et al. (2023) показують, що обслуговування кардана із ширококутовими шарнірами потребує більше часу на очищення і змащення порівняно зі стандартними. На діаграмі порівняно тривалості операцій (збірка, чистка, змащення, пошук) для стандартного кардана (світло-сірі стовпчики) і ширококутового (темно-сірі).

Виробники сільськогосподарської техніки розробляють власні або використовують запатентовані карданні вузли для підвищення надійності.

Walterscheid/GKN: Німецька компанія Walterscheid (зараз частина групи GKN) є одним з лідерів у виробництві карданних валів для сільгосптехніки. Її серії W і WWZ відомі міцністю і довговічністю: випробування показують, що вал серії W має «довгий термін служби, зручність в експлуатації та високу надійність». Walterscheid застосовує шкіряні або полімерні пильовики на шарнірах, усталений захисний кожух з ланцюжком на вилки і деталей, а також запобіжні зчеплення (щоб передавати момент лише до певного порогу, виключаючи критичне перевантаження). Наприклад, новий вал WWZ 2380 має ширококутні шарніри на обох кінцях, що дозволяє працювати під кутом до 80°, але водночас надійно передавати момент і просто обслуговуватися. Компоненти цієї серії стандартизовані – їх легко замінити у разі поломки.

Кардан Walterscheid з широким кутом шарнірів. Як зазначає виробник, усі компоненти W-серії спроектовані для високої надійності і простоти обслуговування (оригінал: Walterscheid).

John Deere: Компанія John Deere оснащує свої трактори надійними карданними валами власної конструкції або використовує спільні рішення з постачальниками. Наприклад, деякі їхні валові системи побудовані за технологією «Multi-Range PTO», що дозволяє обирати різні швидкості валу, і при цьому мають вбудовані запобіжні муфти (торсіонні фірмові зчеплення) для захисту при перевантаженні. John Deere також активно впроваджує контрольні

точки та фіксовані індикатори зносу: на деяких моделях є знімні нагрівачі або рукоятки, що вказують, коли закінчився межа ресурсів. Докладних публікацій мало, але в сервісних мануалах JD наголошується на регулярній перевірці кардана та перевірці герметичності шліцьових муфт.

ZF Friedrichshafen (ZF): Хоча ZF більш відома своїми трансмісіями, вона також постачає комплектуючі до карданних валів (через дочірні компанії, наприклад, ZF-Aftermarket). Для с/г техніки часто використовуються шарніри ZF-Advance з малим міжцентровим кутом при роботі, що знижують вібрації. Також ZF відома рульовими механізмами і гідравлікою, а у сфері карданів її найчастіше називають у контексті вторинних компонентів (постачає крестовини, підшипники тощо). Зокрема, ZF рекомендує свої жирові змащувачі (сумісні з NLGI 2) для ущільнених з'єднань своїх шарнірів.

Claas, Fendt, Amazone, ці виробники тракторів і агрегатів мають свої вимоги до валів. Claas (комбайни) та Fendt (трактори) зазвичай комплектують машини шарнірами з подовженими вузлами, що використовують власні авторські зчеплення і датчики стану (особливо в преміальних серіях). Amazone, як виробник ґрунтообробної та посівної техніки, також переважно використовує посилені універсальні вали з високою герметизацією і часто співпрацює з Walterscheid/GKN або з Innerberger (австрійська фірма, відома своїми системами захисту валів). Детальних технічних описів у відкритих джерелах мало, але на практиці відомо, що всі ці бренди надають пріоритет інтегрованим запобіжникам (фрикційним або обгінним муфтам), високоякісним матеріалам, а також рекомендаціям по регулярному обслуговуванню своїх валів.

Значна роль у підтримці ресурсів карданів належить системам діагностики і моніторингу. На машині можуть бути встановлені сенсори вібрацій або температури на опорних вузлах: у час експлуатації вони сигналізують про перегрів підшипників чи аномальні вібрації, що свідчать про початок руйнування шарнірів. Наприклад, за результатами лабораторних випробувань, підйом середньої температури валу на 19% перед передачею призводив до

передчасного виходу з ладу другого шарніра. Використання безконтактних пірометрів або термокамер на кейсі валу дозволяє встановити «порогові» значення, при яких необхідно зупинити техніку для ревізії.

Регулярний контроль технічного стану включає й протоколи огляду: наприклад, через певну кількість мотогодин варто перевіряти центральну підшипникову опору на предмет люфтів, а також підтягувати всі кінцеві кріплення валів. Сучасні сервісні стратегії агротехніки дедалі більше орієнтуються на прогнозне обслуговування: використовуючи телеметрію трактора (робочі години, число циклів зчеплення, навантаження), сервісні центри радять замінити вузли кардана завчасно, перед явним виходом з ладу. Компанії-кластери агросектору активно впроваджують системи «поки що справний/поки що не замінювати» → «умовно необхідно замінити», спираючись на цифрові моделі надійності.

Висновки по розділу

У сільськогосподарській техніці карданні передачі піддаються суворим умовам експлуатації, тому для забезпечення їхньої довговічності застосовуються комплексні заходи. *Серед основних напрямків — удосконалення конструкції шарнірів (додавання проміжних опор, ширококутових або подвійних шарнірів), використання нових зносостійких матеріалів та напилень, а також поліпшення герметизації і захисних кожухів.* Не менш важливим є систематичне технічне обслуговування: регулярне змащення спеціальними мастилами, балансування валів, перевірка стану підшипників і кріплень. Сучасні технології сервісу (цифрові помічники з графіком обслуговування, моніторинг стану через сенсори) дозволяють істотно знизити ймовірність аварій та скоротити витрати мастил і запчастин. Наведені приклади рішень від провідних виробників підтверджують, що інвестиції в якісні конструктивні елементи (точно збалансовані вали, високоякісні підшипники, надійні запобіжні муфти) і дотримання регламентів є ключем до підвищення надійності карданних передач у сільському господарстві.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для реалізації технологічного процесу електромеханічного поверхневого загартування шліців карданого вала в умовах одиничного та ремонтного виробництва застосовується комплекс спеціалізованого обладнання й допоміжного оснащення, який забезпечує стабільність режимів обробки та відтворюваність результатів зміцнення. Основним елементом такого комплексу є установка електромеханічної обробки, що дозволяє поєднувати механічний вплив різального інструмента з локальним нагрівом поверхні за рахунок пропускання електричного струму через зону контакту.

Для закріплення та позиціонування оброблюваних шліців карданого вала використовуються телескопічні державки або спеціалізовані пристосування, конструкція яких забезпечує надійне базування деталі, компенсацію можливих відхилень геометричних розмірів і зручність налагодження процесу. Підведення електричного струму до зони обробки здійснюється за допомогою струмопідвідного пристрою, який забезпечує стабільний електричний контакт та мінімізує втрати енергії. Передавання потужності від джерела живлення до робочого вузла виконується силовими струмопідвідними кабелями відповідного перерізу, розрахованими на робочі струми, що виникають під час електромеханічного загартування.

Виготовлення та попередня механічна обробка деталей у ремонтному виробництві, зокрема токарна обробка шліців карданого вала, здійснюється на універсальних токарно-гвинторізних верстатах типу 16К20 (рис. 2.1), які широко застосовуються у ремонтних майстернях завдяки своїй універсальності, достатній жорсткості та можливості обробки деталей різної номенклатури. Такі верстати дозволяють виконувати як чорнові, так і чистові операції, забезпечуючи необхідну точність розмірів перед подальшим зміцненням поверхні.

Операції електромеханічної обробки виконуються токарем-оператором, який поєднує функції керування верстатом і контролю технологічних параметрів процесу. При цьому працівник здійснює стандартні операції різання, одночасно забезпечуючи дотримання заданих режимів подачі, швидкості обертання та сили струму, що є вирішальними для формування зміцненого поверхневого шару з підвищеними експлуатаційними властивостями [2].

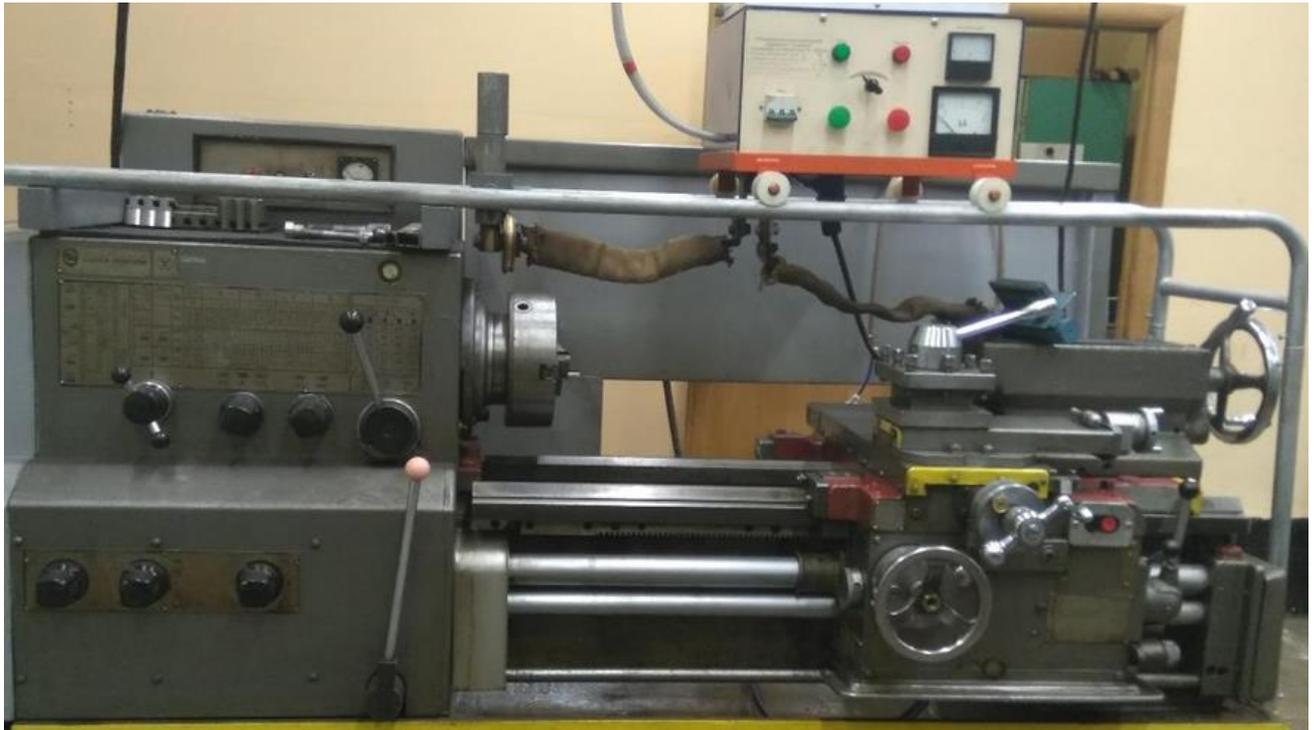


Рис. 2.1. Установа для ЕМО.

становка електромеханічної обробки призначена для реалізації технологічних операцій електромеханічного поверхневого загартування деталей машин, зокрема втулок, в умовах ремонтного та одиничного виробництва. Застосування такої установки дає змогу здійснювати локальне зміцнення робочих поверхонь без необхідності використання складного термічного обладнання, що є особливо важливим для ремонтних підприємств і майстерень із обмеженою виробничою базою.

Конструктивно установка електромеханічного поверхневого загартування (рис. 2.2) являє собою компактний технологічний комплекс, до складу якого входить силовий трансформатор, призначений для пониження напруги та забезпечення необхідних значень електричного струму в зоні обробки. Робота

трансформатора узгоджується з системою керування, яка дозволяє регулювати режими електромеханічної обробки залежно від матеріалу деталі, геометричних параметрів та заданої глибини зміцненого шару.

У складі установки передбачені прилади контролю, керування та захисту, які забезпечують безпечну та стабільну експлуатацію обладнання. До них належать вимірювальні прилади для контролю сили струму, напруги та температурних режимів, елементи захисту від коротких замикань і перевантажень, а також органи керування, що дозволяють оператору оперативно змінювати параметри процесу без зупинки обробки. Усі перелічені елементи конструктивно об'єднані в єдиний корпус, що спрощує монтаж установки, її транспортування та обслуговування в умовах ремонтного виробництва.

Окремим функціональним вузлом установки є охолоджувальна частина, призначена для відведення тепла від силових і робочих елементів під час електромеханічного загартування. Система охолодження забезпечує підтримання допустимих температурних режимів трансформатора, струмопідвідних елементів та робочого інструмента, що запобігає їх перегріванню, підвищує надійність роботи установки та стабільність технологічного процесу [2].



Рис. 2.2. Установка для ЕМП загартування [2].

Установка електромеханічного поверхневого загартування виконана у вигляді автономного технологічного блока, змонтованого в металевій шафі закритого типу. Таке конструктивне виконання забезпечує захист силових та керувальних елементів від механічних пошкоджень, пилу і вологи, а також підвищує електробезпеку під час експлуатації. Завдяки компактним габаритам установка може бути розміщена у безпосередній близькості до металорізального верстата в будь-якому зручному для оператора місці, що спрощує організацію робочої зони та зменшує втрати напруги у струмопідвідних лініях.

Контроль технологічних режимів електромеханічної обробки здійснюється за допомогою вимірювальних приладів, зокрема амперметра і вольтметра, які дозволяють оперативно відстежувати значення сили струму та напруги в процесі загартування. На передній панелі установки також розміщено світлову сигнальну апаратуру, що включає сигнальні лампи «мережа» та «робота», які інформують оператора про наявність живлення та активний стан установки. Окрім цього, на панелі змонтовано автоматичний вимикач, кнопкову станцію керування, маховик тиристорного приводу для плавного регулювання вихідної напруги, а також інші елементи сигналізації, контролю та візуального спостереження за роботою обладнання [20].

Процеси вмикання та вимикання установки здійснюються через магнітний пускач із використанням переносної кнопкової станції, що забезпечує зручність керування та підвищує безпеку обслуговуючого персоналу. Така схема дозволяє оператору виконувати керування установкою безпосередньо з робочого місця біля верстата, не відволікаючись від контролю процесу обробки. Спеціальний інструмент підводять до оброблюваної поверхні деталі таким чином, щоб у зоні контакту забезпечувався надійний електричний контакт, необхідний для стабільного протікання струму та формування заданого температурного режиму електромеханічного загартування [20].

Основні технічні характеристики установки електромеханічного поверхневого загартування наведені в таблиці 2.1, де представлені параметри

електроживлення, діапазони регулювання струму та напруги, потужність, а також інші експлуатаційні показники, що визначають можливості застосування обладнання в умовах ремонтного виробництва [20].

Безпосереднє керування роботою установки здійснюється за допомогою кнопок управління, розташованих на панелі та переносній кнопковій станції. Загальне вмикання і вимикання електроживлення реалізується важелем автоматичного вимикача номінальним струмом 63 А, який забезпечує захист електричного кола від перевантажень і коротких замикань. Підведення електричного струму від вторинної обмотки силового трансформатора до робочого інструмента здійснюється за допомогою комплекту мідних струмопідвідних шин. При цьому довжина шин повинна бути мінімальною з метою зменшення електричних втрат і нагрівання, а їх кріплення — надійним як до вторинної обмотки трансформатора, так і до струмопідвідних планок телескопічної державки та струмопідвідного пристрою.

Для забезпечення стабільного теплового режиму роботи силових елементів в установці передбачено примусову систему повітряного охолодження, реалізовану за допомогою вентилятора. Система охолодження сприяє ефективному відведенню тепла від трансформатора, тиристорного приводу та струмопідвідних елементів, що запобігає їх перегріванню, підвищує надійність роботи установки та забезпечує стабільність параметрів електромеханічного поверхневого загартування протягом усього технологічного циклу.

У межах виконання дослідження було розроблено удосконалену конструкцію струмопідвідного пристрою (рис. 2.3), яка забезпечує ефективне та надійне підведення електричного струму до оброблюваної деталі під час електромеханічної поверхневої обробки. Запропоноване конструктивне рішення принципово відрізняється від традиційних схем тим, що повністю виключає використання міднографітових щіток, які характеризуються підвищеним зносом, нестабільністю електричного контакту та потребують частого технічного обслуговування.

Крім того, нова конструкція струмопідвідного пристрою дозволяє здійснювати підведення електричного струму безпосередньо до зони обробки, минаючи токарний патрон токарно-гвинторізного верстата, що обертається. Це суттєво знижує втрати електричної енергії, підвищує електробезпеку та усуває негативний вплив струмів на вузли верстата, зокрема на підшипники шпинделя, які можуть зазнавати електроерозійного зношування.

Підведення електричного струму в запропонованій конструкції реалізується за допомогою обертового струмопідвідного ролика, виготовленого з бронзи або міді, що характеризуються високою електропровідністю та зносостійкістю. Ролик встановлюється таким чином, щоб перебувати в постійному контакті з однією з поверхонь оброблюваної деталі або з елементом спеціального пристосування, забезпечуючи стабільний і рівномірний електричний контакт у процесі обертання деталі. Обертання ролика синхронізується з рухом деталі, що дозволяє зменшити тертя у зоні контакту та мінімізувати інтенсивність зношування контактних поверхонь.

При проектуванні струмопідвідного ролика особливу увагу приділено геометричним параметрам контактної зони. Зокрема, ширина контактної поверхні ролика приймається не менш ніж у два рази більшою за ширину інструментального ролика або робочої пластини, що безпосередньо здійснює електромеханічну обробку. Таке співвідношення розмірів забезпечує зниження питомого контактного тиску, стабілізацію щільності струму в зоні контакту, зменшення локального нагрівання та підвищення довговічності як струмопідвідного пристрою, так і оброблюваної поверхні [2].

Підведення електричного струму від другого виводу вторинної обмотки силового трансформатора установки електромеханічного поверхневого загартування до робочого інструмента здійснюється за допомогою телескопічної державки. Державка (рис. 2.4) встановлюється у різцетримачі токарно-гвинторізного верстата та конструктивно відокремлюється від металевих

елементів верстата шляхом використання ізоляційних прокладок із текстоліту, що запобігає виникненню небажаних електричних контактів і витоків струму.



Рис. 2.3. Загальна компоновка та розміщення струмопідвідного пристрою на токарно-гвинторізному верстаті [2].

Забезпечення необхідного контактного зусилля в зоні взаємодії робочого інструмента з поверхнею оброблюваної деталі реалізується за рахунок спеціально відкаліброваної (тарованої) пружини. Даний пружний елемент дозволяє підтримувати стабільне та рівномірне притискне зусилля незалежно від незначних коливань положення деталі або інструмента під час обробки. Пружину розміщують усередині корпусу державки, встановлюючи її між рухомим штоком і упорною торцевою частиною корпусу, що забезпечує надійність роботи вузла та підвищує стабільність параметрів електромеханічного поверхневого загартування [20].



Рис. 2.4. Телескопічна державка з інструментальним ролик, встановлена в різцетримачі токарно-гвинторізного верстата

Налагодження пристосування для електромеханічної обробки виконується за визначеною технологічною схемою. На початковому етапі інструментальні ролики підводять до оброблюваної деталі до моменту їх безпосереднього контакту з робочою поверхнею. Після цього шляхом послаблення фіксувальної гайки забезпечується вивільнення штока, який під дією попередньо відкаліброваної пружини автоматично притискає інструмент до поверхні деталі з заданим контактним зусиллям. Така послідовність налаштування дозволяє досягти стабільного притискного навантаження в зоні обробки та забезпечує рівномірність перебігу процесу електромеханічного поверхневого загартування [2].

Підведення електричного струму до зони взаємодії інструмента з поверхнею деталі від вторинної обмотки силового трансформатора установки електромеханічної обробки здійснюється за допомогою силових струмопідвідних кабелів або мідних струмопідвідних шин. З метою зменшення електричних втрат та підвищення стабільності режимів обробки установку електромеханічної обробки доцільно розміщувати у безпосередній близькості до робочого місця токаря. При цьому рекомендований переріз силових кабелів або мідних шин повинен становити не менше 150 мм², що забезпечує безпечне проходження робочих струмів без надмірного нагрівання. Довжина струмопідвідних елементів, у свою чергу, має бути мінімально можливою, що сприяє зниженню падіння напруги та підвищенню енергетичної ефективності процесу електромеханічної обробки [2].

У процесі експериментальних досліджень використовували зразки, виготовлені з конструкційних і інструментальних матеріалів, зокрема сталей 45, 40Г, 40Х, У8, ШХ15, а також сірого чавуну марки СЧ35. Такий вибір матеріалів зумовлений їх широким застосуванням у деталях сільськогосподарських машин та необхідністю оцінки ефективності електромеханічного поверхневого загартування для різних структурних станів і хімічного складу.

Для реалізації процесів електромеханічного поверхневого загартування інструмент повинен відповідати підвищеним вимогам щодо експлуатаційних властивостей, насамперед мати високу зносостійкість і значну червоностійкість. Це обумовлено тим, що під час електромеханічного зміцнення та електромеханічного відновлення деталей на робочі поверхні інструмента одночасно діють інтенсивні електричні та механічні навантаження. У зоні контакту між інструментом і поверхнею оброблюваної деталі формується локальний високотемпературний осередок, у якому температура може досягати 1000...1100 °С.

Контактне зусилля між інструментом і поверхнею деталі є одним із визначальних параметрів процесу і, за результатами досліджень, приймається в межах 200...500 Н. За таких умов інструмент зазнає значних термомеханічних впливів, тому його червоностійкість повинна істотно перевищувати теплостійкість матеріалу, що обробляється. Це дозволяє зберігати працездатність інструмента, стабільність геометрії робочої поверхні та сталість режимів електромеханічного впливу протягом усього процесу обробки. Інструментальні ролики, які застосовувалися під час проведення електромеханічного поверхневого загартування, наведені на рис. 2.5 [2].



Рис. 2.5. Інструментальний ролик.

Визначення твердості зміцненого поверхневого шару здійснювали із застосуванням переносного твердоміра МЕТ У1 (рис. 2.6), що дозволяє оперативно проводити контроль механічних властивостей безпосередньо на

зразках після електромеханічної обробки. Використання даного приладу забезпечує достатню точність вимірювань і можливість багаторазового контролю твердості в різних зонах поверхні.

Підготовку мікрошліфів для металографічних досліджень виконували за стандартною методикою, яка включала послідовні операції механічного шліфування, тонкого полірування та подальшого травлення з метою виявлення мікроструктури матеріалу. Такий підхід дозволяє отримати чітке відображення структурних змін, що відбуваються в поверхневому шарі внаслідок електромеханічного загартування.

Розділення зразків на необхідні фрагменти для подальших досліджень здійснювали з використанням відрізної установки Struers Secotom-15 (рис. 2.7), яка забезпечує точне та малодеформаційне різання матеріалу, що є важливим для збереження структури зміцненого шару та коректності подальшого аналізу.



Рис. 2.6. Компактний твердомір MET
У1



Рис. 2.7. Пристосування для різання
зразків Struers Secotom-15

Підготовлені після різання зразки після попереднього усунення грубих задирок із застосуванням алмазних надфілів різної зернистості піддавалися запресовуванню в термореактивну смолу Durofast. Процес пресування здійснювали з використанням автоматизованої установки CityPress-20 (рис. 2.8), що забезпечує надійне закріплення зразків і зручність їх подальшої обробки та дослідження.

Операції шліфування та полірування виконували на спеціалізованій установці з поетапним застосуванням шліфувальних і полірувальних дисків із поступовим зменшенням зернистості абразиву. Така послідовність дозволяла забезпечити рівномірне видалення поверхневих дефектів і формування якісної поверхні мікрошліфів. Після завершення кожного етапу обробки зразки разом із робочими елементами установки ретельно промивали з метою видалення залишків абразивних і металевих частинок, що запобігало їх повторному потраплянню на поверхню та появі подряпин.

Фінішне полірування здійснювали на диску з суконним покриттям, який зволожували водною абразивною суспензією, що містила частинки з характерними розмірами 9 мкм, 3 мкм та 1 мкм. Полірування проводили з використанням автоматизованої установки Tegramin-25 (рис. 2.9), що забезпечує стабільність режимів обробки та високу якість підготовки поверхні мікрошліфів для подальшого металографічного аналізу.

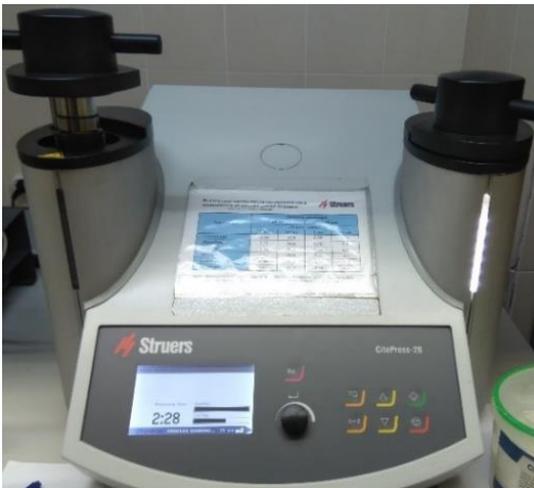


Рис. 2.8. Пристрій CitoPress-20



Рис. 2.9. Tegramin-25

Травлення підготовлених шліфів здійснювали з використанням 4-відсоткового розчину азотної кислоти в етиловому спирті, що забезпечувало чітке проявлення мікроструктури матеріалу та меж структурних складових після електромеханічної обробки.

Металографічний аналіз отриманих зразків виконували із застосуванням оптичного металографічного мікроскопа GX-51 виробництва компанії

OLYMPUS за різних ступенів збільшення (рис. 2.10). Це дозволяло детально дослідити характер структурних змін у поверхневому шарі, оцінити глибину зміцнення та виявити особливості формування мікроструктури в зоні електромеханічного загартування.

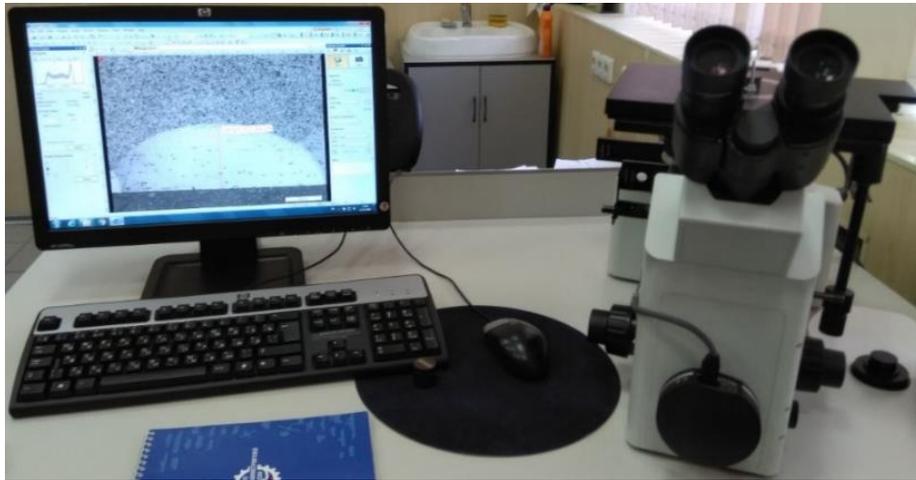


Рис. 2.10. Olympus GX-51 (мікроскоп).

Визначення мікротвердості зміцненого поверхневого шару здійснювали із використанням мікротвердоміра DuraScan EMCOTEST (рис. 2.11) на попередньо підготовлених мікрошліфах. Проведення вимірювань у контрольованих умовах дозволяло отримати достовірні дані щодо розподілу мікротвердості в зоні електромеханічного зміцнення та оцінити глибину й однорідність сформованого зміцненого шару.

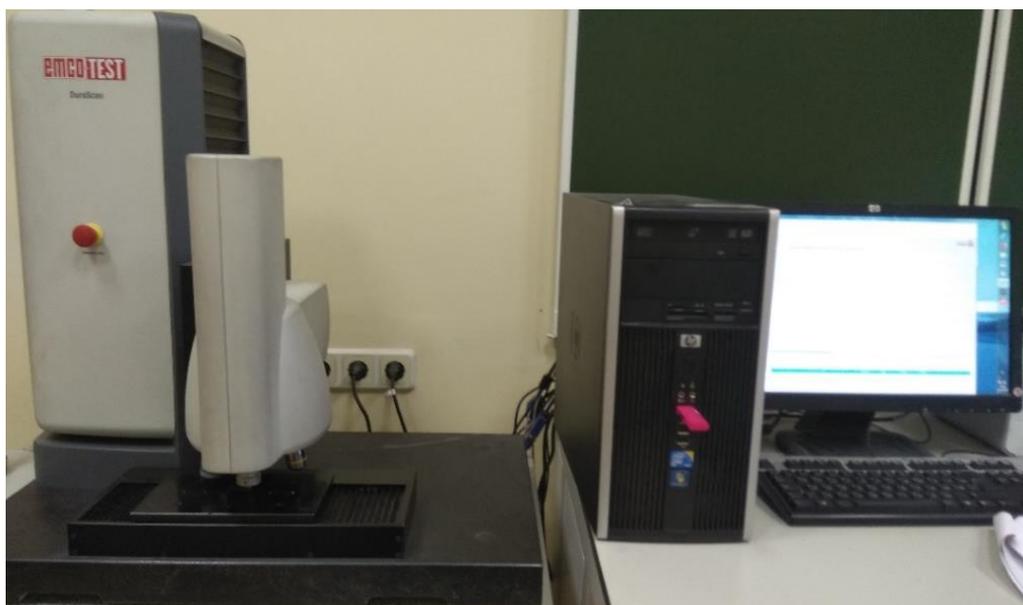


Рис. 2.11. DuraScan EMCO-TEST – твердомір.

Оцінювання зношування дослідних зразків здійснювали методом масового контролю шляхом зважування до та після проведення випробувань. Для цього використовували аналітичні ваги AND GH-252 з максимально допустимою масою зважування 250 г та дискретністю вимірювання 0,00001 г (рис. 2.12), що забезпечувало високу точність визначення втрати маси в процесі зношування.

Дослідження мікроструктури та фрактографічних особливостей термічно зміцнених поверхневих шарів виконували із застосуванням скануючого електронного мікроскопа TESCAN VEGA II LMH, оснащеного енергодисперсійною системою аналізу хімічного складу Oxford Instruments INCAx-sight 5518 (рис. 2.13). Застосування даного комплексу обладнання дозволяло здійснювати детальний аналіз морфології поверхні, характеру руйнування та елементного складу зміцнених шарів після випробувань.

Рентгенофазові дослідження сталей виконували з використанням рентгенівського дифрактометра ДРОН-4-07, що забезпечувало визначення їх фазового складу.

ЕМПЗ зразків виконували на токарно-гвинторізному верстаті (рис. 2.14) з режимами: швидкість загартування 1,2 м/хв; сила струму у вторинному колі 1600 А; напруга вторинного кола 3 В; зусилля стиснення інструменту 400 Н; подача інструменту 2,5 мм/об.



Рис. 2.12. Ваги

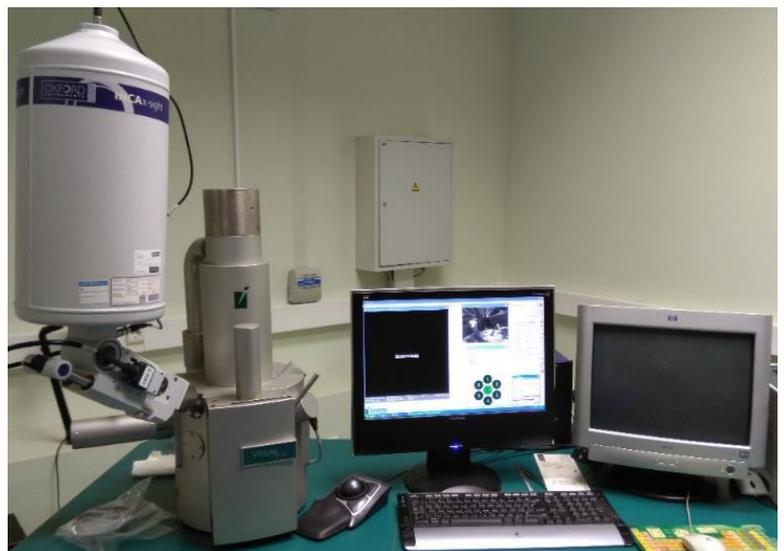


Рис. 2.13. Мікроскоп TESCAN VEGA II LM

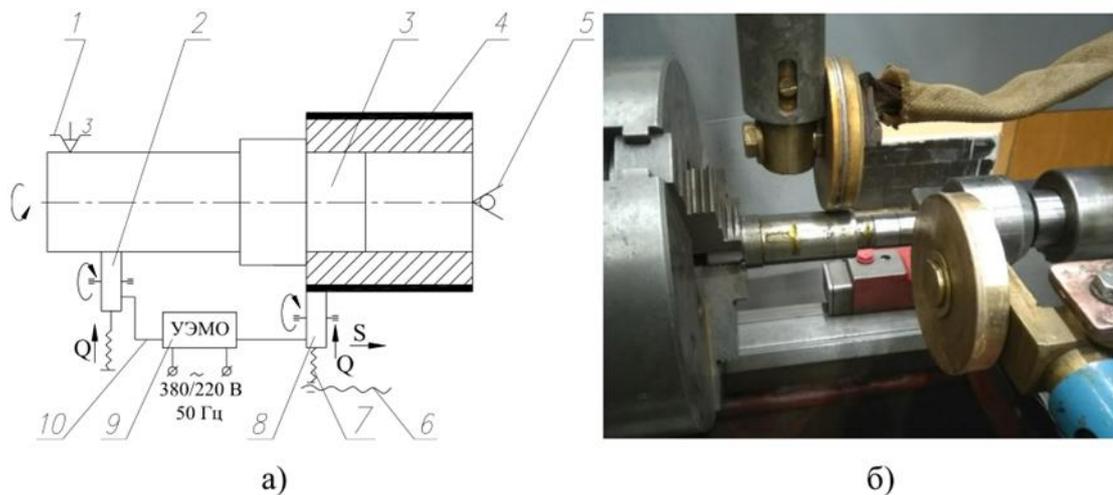


Рис. 2.14. Схема ЕМПЗ: а) принципова схема; б) загальний вигляд. 1 – трикулачковий патрон, що самоцентрується; 2 – струмопідвідний ролик; 3 – оправлення; 4 – зразок; 5 – обертовий центр; 6 – ходовий гвинт верстата; 7 – телескопічна державка; 8 – інструментальний ролик; 9 – установка електромеханічного оброблення; 10 – струмопідвідні шини.

Для виконання зношувальних випробувань було спроектовано та виготовлено спеціалізований випробувальний стенд, який дозволяє відтворювати реальні умови експлуатації шлиців карданних валів, відповідні схеми навантаження та характер зношування їх робочих поверхонь. Проведення випробувань здійснювали на настільному токарному верстаті «Старт ТН-150» (рис. 2.15, 2.16), що працював з частотою обертання 2000 об/хв, що відповідає інтенсивному експлуатаційному режиму.

Оправку 2 встановлювали та фіксували у трикулачковому самоцентрувальному патроні 1 токарного верстата. Захисна втулка під час випробувань оберталася спільно з валом завдяки болтовому з'єднанню 10, тоді як сальник 8 був жорстко закріплений у корпусі 7 за допомогою фланця 4, що забезпечувало сталі умови контакту в зоні тертя.

Державку 11, приварену до корпусу 7, встановлювали в різцетримачі верстата 12, забезпечуючи необхідне положення та притиск у зоні взаємодії елементів. У процесі випробувань у контактну зону між сальниковою набивкою

та поверхнею втулки через систему подачі 6 безперервно подавали воду разом з абразивними частинками, що дозволяло моделювати умови зношування в агресивному середовищі, характерному для роботи вузлів сільськогосподарських машин.

Як ущільнювальний елемент у зношувальних випробуваннях використовували сальникову набивку наскрізного плетіння марки АП-31 діаметром 6 мм. Тривалість кожного випробування становила 30 хвилин для одного зразка, що забезпечувало отримання порівнюваних та репрезентативних результатів зношування.

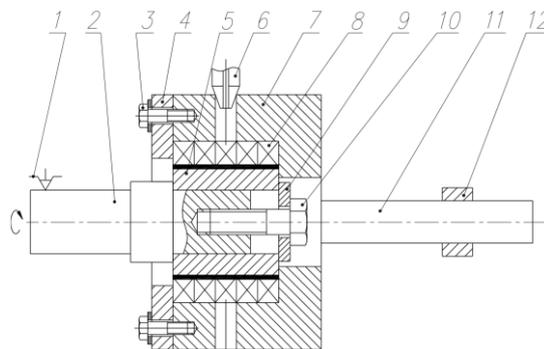


Рис. 2.15. Схематичне зображення пристосування для проведення зносостійких випробувань: 1 – трикулачковий самоцентрувальний патрон; 2 – оправка; 3, 10 – кріпильні болти; 4 – фланцевий елемент; 5 – захисна втулка; 6 – система краплинної подачі; 7 – корпус пристосування; 8 – сальникова набивка; 9 – шайба; 11 – державка; 12 – різцетримач.



Рис. 2.16. Зовнішній вигляд пристосування для зносостійких випробувань.

Висновки до розділу

У межах виконаного розділу було розроблено та обґрунтовано комплект спеціалізованого обладнання, технологічного оснащення та інструментальних роликів, призначених для реалізації процесу електромеханічного поверхневого загартування зовнішніх поверхонь шліців карданних валів в умовах агропромислового комплексу. Запропоновані технічні рішення забезпечують можливість ефективного впровадження процесу ЕМПЗ у ремонтному виробництві сільськогосподарської техніки.

Крім того, спроектовано та виготовлено випробувальний стенд для проведення зносостійких досліджень, який дозволяє відтворювати реальні умови експлуатації, схеми навантаження та характер зношування шліців карданного вала. Використання даного стенда забезпечує отримання об'єктивних експериментальних даних щодо зносостійкості сталей після електромеханічного поверхневого загартування та дає змогу здійснювати порівняльну оцінку ефективності застосованих технологічних рішень.

поверхневого загартування щодо підвищення експлуатаційних властивостей досліджуваних матеріалів.

Узагальнення результатів показує, що після проведення ЕМПЗ твердість поверхні дослідних зразків збільшилася у 1,7...2,5 раза, залежно від марки матеріалу та його початкового структурного стану, що свідчить про універсальність і технологічну доцільність застосування даного способу зміцнення [1].

Для більш детальної оцінки характеристик сформованого зміцненого шару було виконано вимірювання мікротвердості по глибині зони зміцнення після електромеханічного поверхневого загартування. Дослідження проводили з використанням мікротвердоміра DuraScan EMCOTEST за методикою HV0,1, що дозволило встановити розподіл мікротвердості в приповерхневих шарах матеріалу (табл. 3.1) [9].

Таблиця 3.1 – Розподіл мікротвердості зміцненого шару досліджуваних матеріалів залежно від глибини від поверхні.

№ п/п	Відстань від поверхні, мм	Мікротвердість, HV					
		40Г	40Х	45	У8	ШХ15	СЧ35
1	0,05	717	736	755	894	778	945
2	0,2	706	755	767	863	752	739
3	0,35	695	755	748	848	739	525
4	0,50	706	793	678	848	663	382
5	0,65	695	702	702	848	484	387
6	0,8	256	311	278	555	238	327
7	0,95	247	288	276	249	244	307

Результати експериментальних досліджень показали, що після проведення електромеханічного поверхневого загартування відбувається істотне підвищення мікротвердості приповерхневих шарів досліджуваних сталей порівняно з їх початковим станом. Залежно від хімічного складу та структурних особливостей матеріалу, зростання мікротвердості становило 2,6...3,6 раза, що підтверджує високу інтенсивність структурних перетворень, спричинених електромеханічним впливом (рис. 3.2).

Абсолютні значення мікротвердості зміцненого шару для сталей після ЕМПЗ знаходилися в межах 700...940 HV, що суттєво перевищує початкові

показники та свідчить про формування високодисперсної загартованої структури з підвищеними механічними властивостями. Отриманий рівень мікротвердості є достатнім для забезпечення підвищеної зносостійкості та опору пластичній деформації в умовах тертя та циклічних навантажень.

Для сірого чавуну СЧ35 після електромеханічного поверхневого загартування також зафіксовано високі значення мікротвердості, які досягали 943 HV. Проте особливістю цього матеріалу є відносно невелика глибина сформованого зміцненого шару, що становила близько 0,2...0,3 мм. Це пояснюється специфікою мікроструктури чавуну та наявністю графітних включень, які обмежують проникнення теплового та механічного впливу вглиб матеріалу [19].

Характерним прикладом ефективності ЕМПЗ є результати, отримані для сталі У8. Так, на глибині 0,05 мм від поверхні збільшення мікротвердості становило приблизно 3,6 раза порівняно з вихідним станом. При цьому сформований градієнтний шар із підвищеними значеннями мікротвердості зберігався на глибині до 1 мм, що свідчить про значну глибину зміцнення та плавний перехід властивостей від поверхні до основного металу за обраних режимів електромеханічного поверхневого загартування [9].

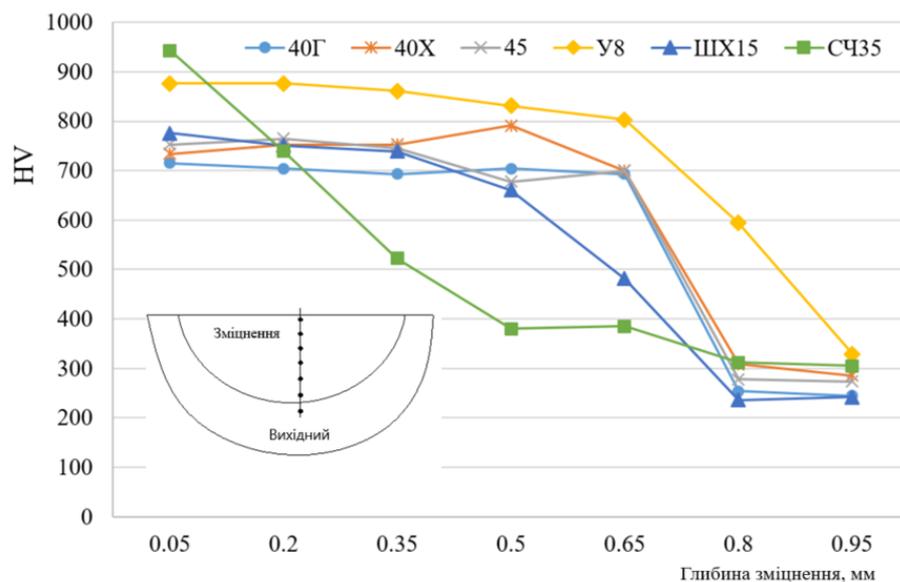


Рис. 3.2. Розподіл мікротвердості зміцненого шару досліджуваних матеріалів залежно від глибини від поверхні

У міру віддалення від поверхні обробки значення мікротвердості поступово знижуються та наближаються до початкових показників основного матеріалу. При цьому перехідна зона характеризується рівнем мікротвердості, нижчим порівняно із зоною так званого «білого шару». Така особливість зумовлена впливом надзвичайно високих температур локального нагріву в поєднанні з інтенсивним охолодженням, однак ці умови виявляються недостатніми для повноцінного загартування відповідних об'ємів матеріалу.

На рис. 3.3 наведено результати вимірювань мікротвердості сталі 40Г у різних структурних зонах, сформованих у процесі електромеханічного поверхневого загартування, що наочно ілюструє характер зміни механічних властивостей по глибині зміцненого шару [9].

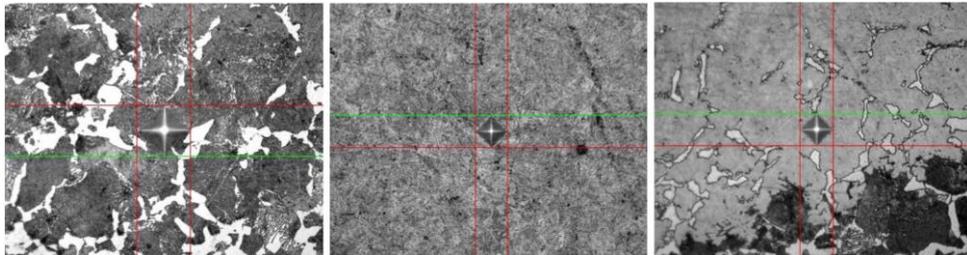


Рис. 3.3. Результати вимірювань мікротвердості сталі 40Г у вихідній, зміцненій та перехідній зонах

У випадку перекриття зон впливу електромеханічного поверхневого загартування формується складна багат шарова структура приповерхневого шару. При цьому по глибині та довжині оброблюваної поверхні спостерігається закономірне чергування повністю загартованої зони, області часткового загартування та зони самовідпуску. Такий структурний стан зумовлений повторним тепловим впливом, коли раніше зміцнені ділянки зазнають додаткового нагріву від сусідніх проходів інструмента, що призводить до локального зниження твердості внаслідок самовідпуску.

Формування зазначених зон обумовлене неоднорідністю температурних полів і різною швидкістю охолодження матеріалу в процесі перекривних проходів. У результаті в окремих ділянках досягаються температури, достатні для повного загартування, тоді як у суміжних зонах реалізується лише часткове

структурне перетворення або термічний відпуск раніше сформованої загартованої структури. Характерне чергування зазначених зон чітко простежується на мікроструктурних зображеннях, наведених на рис. 3.4 та 3.5, і підтверджує необхідність оптимізації режимів електромеханічного поверхневого загартування з метою отримання однорідного зміцненого шару з прогнозованими експлуатаційними властивостями.

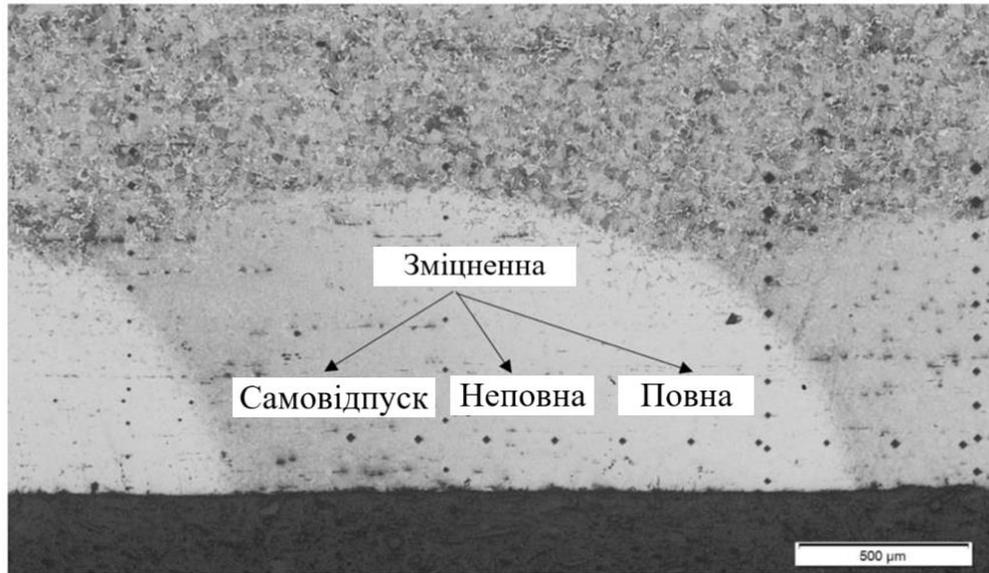


Рис. 3.4. Мікроструктурні особливості зони зміцнення сталі 40Г за умов перекриття проходів електромеханічного поверхневого загартування.

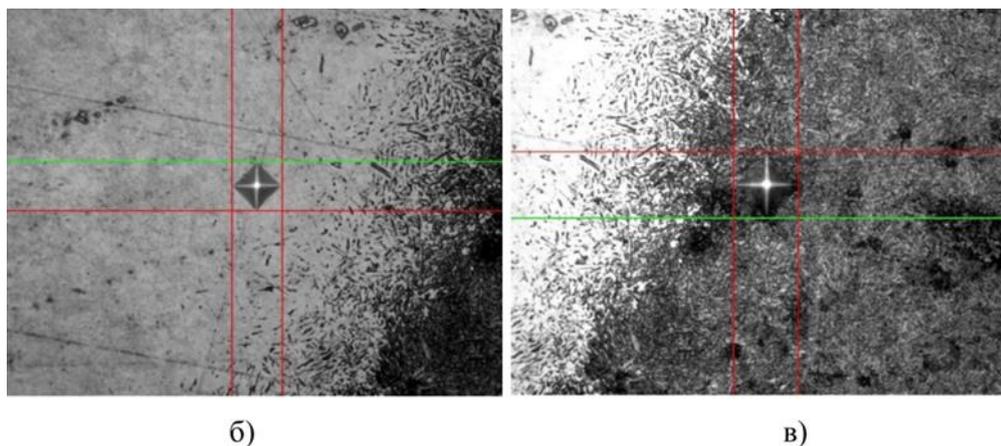


Рис. 3.5. Результати вимірювання мікротвердості сталі 40Г в умовах перекриття проходів: а – повністю загартована зона; б – зона загартування з проявами самовідпуску.

На рис. 3.6 наведено розподіл мікротвердості сталі 40Г вздовж обробленої поверхні залежно від просторового розташування зміцнених зон.

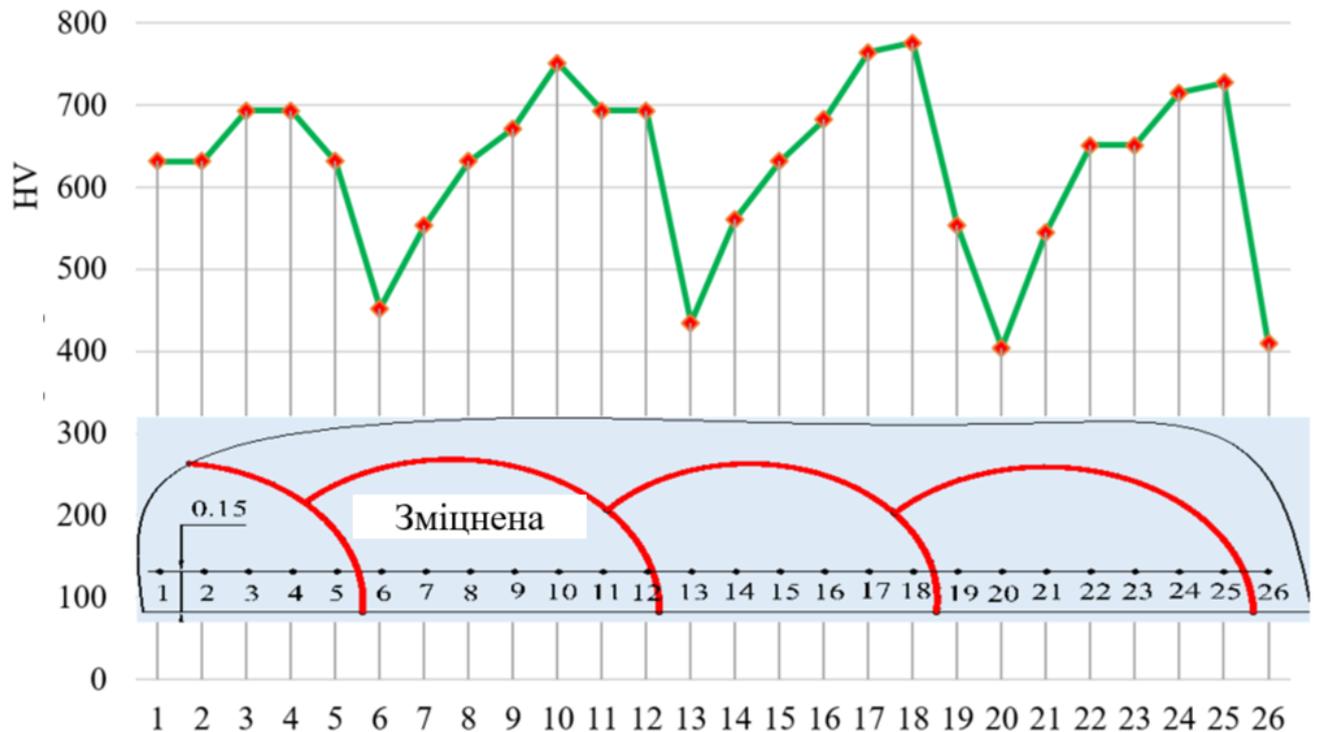


Рис. 3.6. Розподіл мікротвердості сталі 40Г вздовж поверхні на глибині 0,15 мм за умов перекриття зон зміцнення

Хвилеподібний характер зміни значень мікротвердості вздовж обробленої поверхні зумовлений специфікою реалізації електромеханічної обробки та накладанням суміжних проходів інструмента. Такий розподіл властивостей є наслідком нерівномірного теплового впливу в зоні перекриття. Водночас, за умови раціонального вибору режимів електромеханічного поверхневого загартування (швидкості подачі, сили струму, притискного зусилля та кроку перекриття) інтенсивність цього ефекту може бути істотно зменшена, що сприятиме формуванню більш однорідного зміцненого шару.

Повторний тепловий вплив на попередньо сформований трек під час накладання наступного проходу призводить до часткового або повного відпуску мартенситної структури, утвореної на попередньому етапі. У разі повторного нагрівання ділянки до температур, близьких до максимальних значень, характерних для загартування, під час подальшого охолодження в цій зоні знову формується мартенситна структура з високим рівнем мікротвердості. До таких

ділянок належать точки 3, 4, 10, 11, 17, 18, 24, 25, для яких зафіксовано значення мікротвердості в межах 700...770 HV (рис. 3.6).

Ділянки часткового загартування формуються внаслідок повторного нагріву матеріалу до температур, нижчих за критичні значення, необхідні для повного аустенітизування. У цих умовах процес утворення аустеніту відбувається неповністю, а під час охолодження формується суміш мартенситу та фериту. Такому структурному стану відповідають точки 1, 2, 8, 9, 15, 16, 22, 23, для яких характерні проміжні значення мікротвердості в діапазоні 600...680 HV.

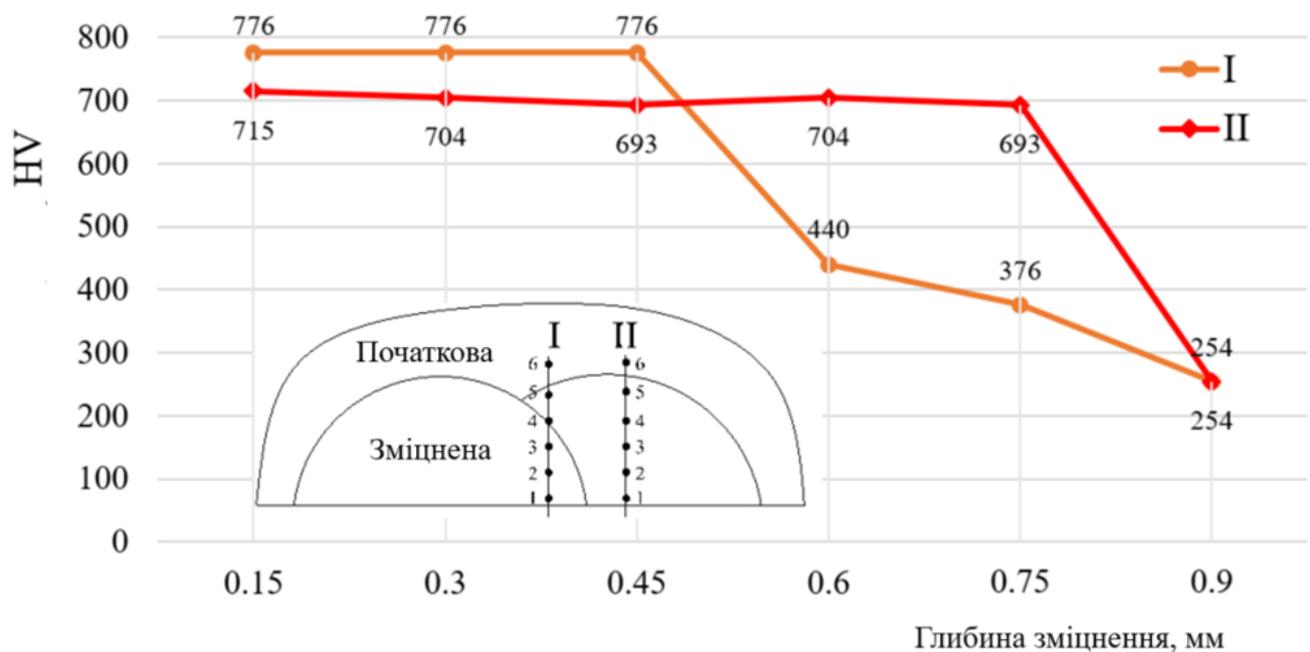
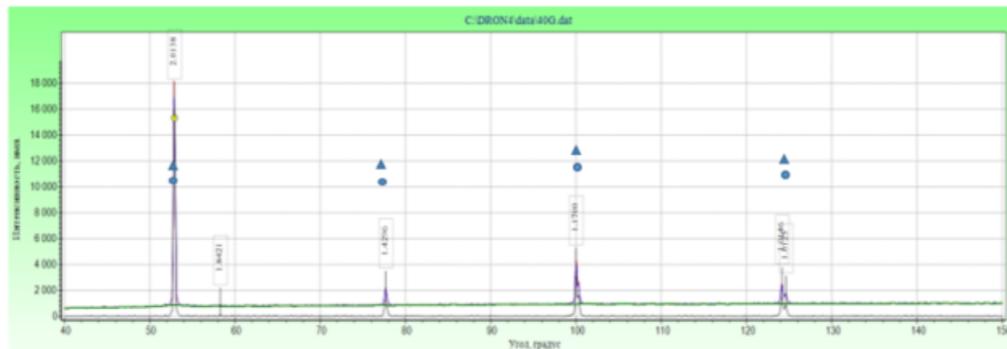


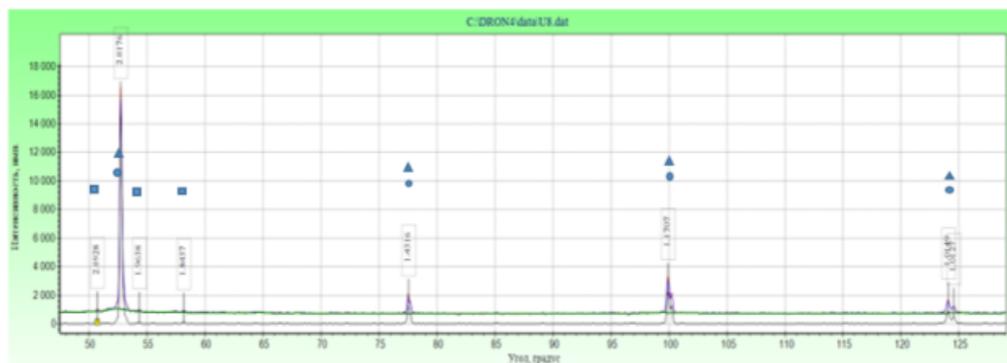
Рис. 3.7. Значення мікротвердості поверхневого шару за умов перекриття проходів

Фазовий склад сталі досліджували методом рентгенофазового аналізу з використанням дифрактометра ДРОН-4-07 при заданих параметрах зйомки. Зокрема, крок сканування становив $0,050^\circ$, рентгенівську зйомку виконували з застосуванням трубки БСВ-27 (Co) за струму 20 mA та напруги 35 kV, а для усунення β -випромінювання використовували залізний β -фільтр. Реєстрацію дифракційних спектрів здійснювали за геометрією Бреґга–Брентано ($\omega/2\theta$) у комбінованому режимі з часом експозиції $t = 3000$ с та швидкістю сканування $V = 4,0^\circ/\text{хв}$. Отримані результати рентгенофазового аналізу наведено на рис. 3.8

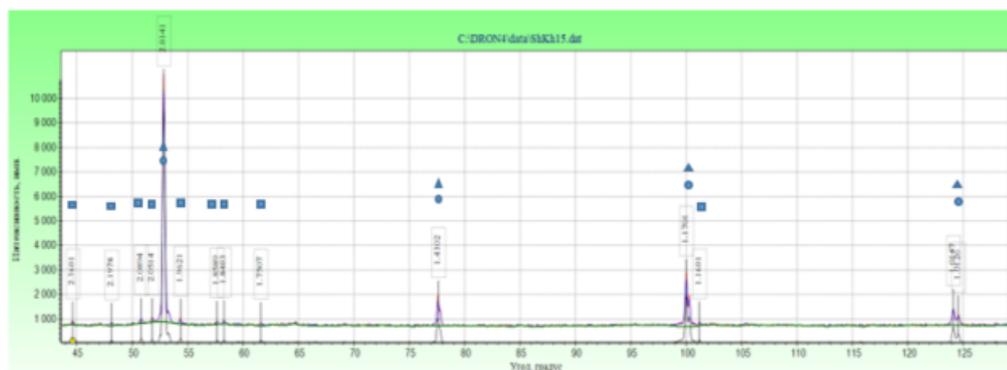
Аналіз дифрактограм свідчить про формування мартенситної фази в зоні зміцнення, що підтверджує ефективність електромеханічного поверхневого загартування та узгоджується з результатами досліджень механічних властивостей зміцненого шару.



а)



б)



в)

▲ - α -Fe; ● - α -мартенсит; ■ - Fe_3C

Рис. 3.8. Дифрактограми дослідних зразків сталей 40Г, У8 та ШХ15.

На рис. 3.9 наведено результати дослідження зношування поверхонь експериментальних зразків у вихідному стані та після проведення електромеханічного поверхневого загартування.

У таблиці 3.2 та на рис. 3.9 наведено результати дослідження зношування поверхонь експериментальних зразків у вихідному стані та після проведення електромеханічного поверхневого загартування.

Таблиця 3.2 – Показники зносу дослідних зразків до та після електромеханічного зміцнення

Тип зразка	Знос, г			
	45	У8	ШХ15	СЧ35
Вихідний	0,04189	0,01311	0,01691	0,02292
ЕМПЗ	0,01370	0,00721	0,0078	0,01229

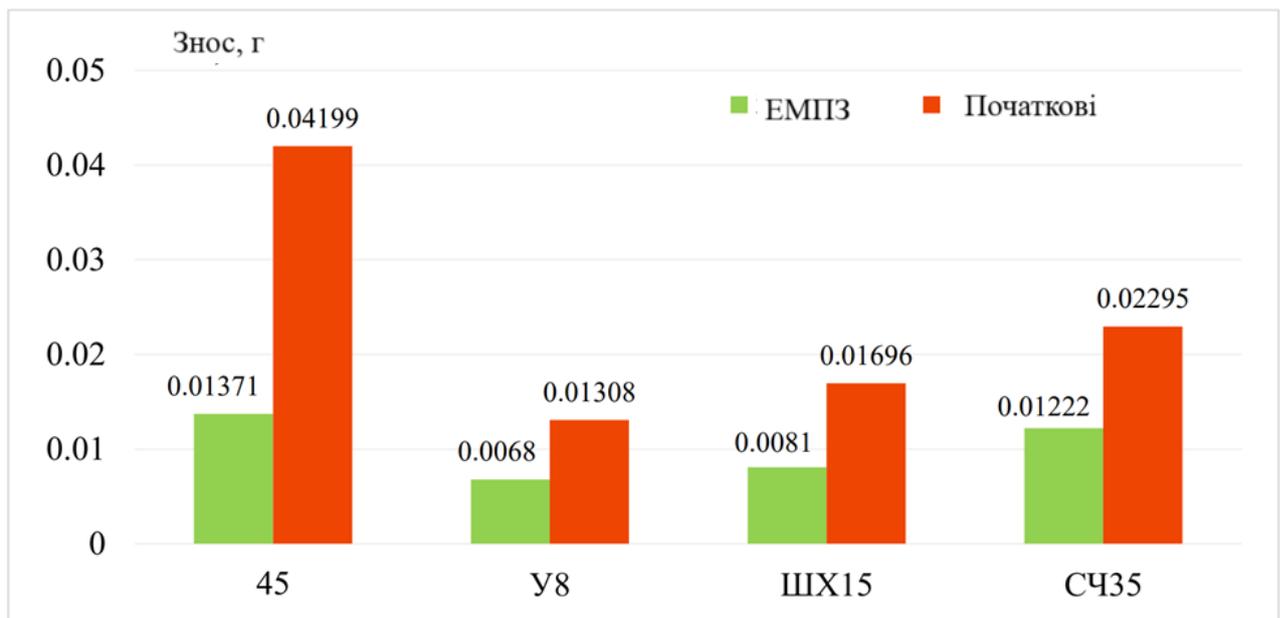


Рис. 3.9. Показники зносостійкості дослідних зразків.

Аналіз результатів зносостійких випробувань показав, що протягом 30 хвилин роботи після електромеханічного поверхневого загартування відбувається істотне підвищення опору зношуванню поверхневого шару досліджуваних матеріалів. Зокрема, для сталі 45 зносостійкість зросла у 3,1 раза, для сталі У8 - у 1,9 раза, для сталі ШХ15 — у 2,5 раза, а для сірого чавуну СЧ35 – у 1,9 раза порівняно з вихідним станом.

Отримані результати свідчать про високу ефективність електромеханічного поверхневого загартування як методу підвищення експлуатаційної довговічності деталей. При цьому встановлено, що застосування зразків зі сталі У8 після ЕМПЗ замість серійних шліців, виготовлених зі сталі 45, дозволяє підвищити зносостійкість відповідних деталей у 6,1 раза, що

підтверджує доцільність використання зміцнених матеріалів для роботи в умовах інтенсивного тертя.

Висновки до розділу

У результаті проведених досліджень встановлено, що мікротвердість зміцнених зон сталей після електромеханічного поверхневого загартування зростає у 2,6–3,6 рази порівняно з вихідним станом на глибині до 1 мм від поверхні. За умов перекриття зон зміцнення формується характерне чергування повністю загартованих ділянок, зон часткового загартування та областей самовідпуску, при цьому рівень мікротвердості вздовж поверхні визначається їх просторовим розташуванням і співвідношенням.

Доведено, що використання зразків зі сталі У8 після електромеханічного поверхневого загартування замість серійних шліців, виготовлених зі сталі 45, забезпечує підвищення зносостійкості деталей у 6,1 рази. При цьому сталь У8 характеризується вищими значеннями мікротвердості та більшою ефективною глибиною зміцненого шару порівняно з іншими дослідженими матеріалами, що свідчить про її кращу придатність для роботи в умовах інтенсивного зношування.

Технологія електромеханічного поверхневого загартування шліців карданних валів є технологічно простою та універсальною, не потребує складного обладнання, відзначається безпечністю й екологічною чистотою, а також порівняно низькою енергоємністю за умови забезпечення необхідного рівня якості деталей машин. Це робить можливим її впровадження на підприємствах різного виробничого рівня.

Таким чином, застосування шліців карданних валів зі сталі У8 з використанням технології ЕМПЗ дозволяє суттєво підвищити їх зносостійкість порівняно з серійними шліцами зі сталі 45. Вищі показники мікротвердості та ефективної глибини зміцненого шару сталі У8 обґрунтовують доцільність її

рекомендації для практичного впровадження під час виготовлення та ремонту шліцьових з'єднань карданних валів у машинобудуванні для агропромислового комплексу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Проведений аналіз сучасних способів зміцнення деталей, а також їх переваг і обмежень, дає підстави рекомендувати технологію електромеханічної обробки, зокрема електромеханічне поверхневе загартування, як один із найбільш результативних методів підвищення зносостійкості шліцьових з'єднань карданних валів.

У межах виконаної магістерської роботи встановлено, що застосування електромеханічної обробки шліців карданних валів забезпечує досягнення максимальних значень мікротвердості поверхневого шару на глибинах до 1,2 мм. У результаті такої обробки мікротвердість зміцнених зон сталей збільшується у 2,6–3,6 рази порівняно з вихідним станом, залежно від марки матеріалу, на глибині до 1 мм від поверхні. За умов перекриття зон зміцнення формується характерне чергування повністю загартованих ділянок, зон часткового загартування та областей самовідпуску, при цьому розподіл мікротвердості вздовж поверхні визначається прийнятою схемою зміцнення.

Результати зносостійких випробувань у парах тертя, що моделюють реальні умови роботи шліців карданних валів, підтвердили істотне підвищення опору зношуванню після електромеханічного загартування. Так, зносостійкість зразків зі сталі 45 зросла у 3,1 рази, зі сталі У8 – у 1,9 рази, зі сталі ШХ15 – у 2,5 рази, а з чавуну – у 1,9 рази порівняно з початковими експлуатаційними характеристиками.

Доведено, що застосування шліців карданних валів, виготовлених зі сталі У8 та зміцнених методом електромеханічної обробки, замість серійних шліців зі сталі 45, дозволяє підвищити їх зносостійкість у 6,1 раза. Отримані результати обґрунтовують доцільність використання сталі У8 для виготовлення та зміцнення шліцьових з'єднань карданних валів з метою підвищення їх експлуатаційної надійності та довговічності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Борак К. В., Куликівський В. Л. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів. Ч. 1: Теоретичні основи матеріалознавства : навч. посіб. Житомир : Поліський нац. ун-т, 2024. 101 с.
2. Бобров В. Ф. Технологія поверхневого зміцнення деталей машин. Київ : Техніка, 2015. 312 с.
3. Бурак Я. Й., Кінаш Р. І. Зміцнення поверхонь деталей електромеханічними методами. Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2018. 256 с.
4. Гуляєв А. П. Металознавство. Москва : Металургія, 2010. 544 с.
5. Григор'єв С. Н. Технології підвищення зносостійкості деталей машин. Харків : ХНАДУ, 2017. 298 с.
6. ДСТУ 2071:2019. Сталі конструкційні вуглецеві та леговані. Марки. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.
7. ДСТУ ISO 6507-1:2019. Металеві матеріали. Визначення твердості за Віккерсом.
8. Ємельянов О. В. Електромеханічна обробка поверхонь деталей машин. Одеса : ОНПУ, 2016. 220 с.
9. Журавльов В. М., Лук'яненко О. С. Підвищення зносостійкості шліцьових з'єднань методом електромеханічного загартування // Вісник машинобудування. 2020. №4. С. 45–52.
10. Зайцев В. М. Методи дослідження структури та властивостей металів. Київ : Вища школа, 2014. 368 с.
11. Іванов О. О. Аналіз зношування шліцьових з'єднань карданних валів сільськогосподарських машин // Техніка і технології АПК. 2019. №6. С. 28–33.
12. Костенко Ю. М. Ремонт і відновлення деталей машин. Київ : Аграрна наука, 2013. 402 с.

13. Кузнецов В. Д. Фізичні основи термічної обробки сталі. Москва : Машиностроение, 2009. 384 с.
14. Лузан С. П. Технології відновлення та зміцнення деталей машин. Київ : Наукова думка, 2022. 296 с.
15. Мельник В. І., Паламарчук В. М. Застосування електромеханічного загартування в ремонтному виробництві // Вісник аграрної науки. 2021. №2. С. 62–68.
16. Павлов П. А. Карданні передачі машин і механізмів. Харків : ХДТУ, 2012. 274 с.
17. Поліщук М. П. Надійність та довговічність деталей трансмісій. Київ : НУБіП України, 2018. 310 с.
18. Попович В. С. Електромеханічні методи поверхневого зміцнення сталей // Матеріалознавство. 2017. №3. С. 19–25.
19. Рахманін І. О. Металографічні методи досліджень. Дніпро : ДНУ, 2016. 198 с.
20. Тарасенко О. М. Підвищення зносостійкості сталей методом електромеханічного загартування // Наукові праці НУБіП України. 2020. Т. 289. С. 114–121.
21. Totten G. E. Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies. Boca Raton : CRC Press, 2013. 816 p.
22. ASM Handbook. Volume 4A: Steel Heat Treating Fundamentals and Processes. ASM International, 2016.
23. Davis J. R. Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics. ASM International, 2002. 386 p.
24. Kalpakjian S., Schmid S. Manufacturing Processes for Engineering Materials. Pearson, 2014. 1216 p.
25. DIN EN ISO 15614-1. Specification and qualification of welding procedures. Berlin, 2018.