

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Технологічні особливості локального поверхневого зміцнення робочого інструменту для обробки ґрунту

Рівень вищої освіти: другий магістерський
Галузь знань: 13 Механічна інженерія
Спеціальність: 132 Матеріалознавство
Освітня програма: Відновлення та технічний сервіс автомобілів

Шифр: КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу,
група МТВАм -24-1

 Віталій ПІДГОРОДЕЦЬКИЙ

Керівник, к.т.н., доцент

 Максим ДИХА

Нормоконтролер, к.т.н., доцент

 Олег БАБАК

До захисту допускаю:
завідувач кафедри ТАМ

 Олександр ДИХА

8 12 2025 р.

Хмельницький, 2025

Факультет: Інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра: трибології, автомобілів та матеріалознавства
Рівень вищої освіти: другий магістерський
Галузь знань: 13 Механічна інженерія
Спеціальність: 132 Матеріалознавство
Освітня програма: Відновлення та технічний сервіс автомобілів

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТАМ
Олександр ДИХА

" 15" жовтня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Підгородецький Віталій Володимирович

1. Тема проекту:

«Технологічні особливості локального поверхневого зміцнення робочого інструменту для обробки ґрунту»

керівник проекту: Диха Максим Олександрович, к.т.н., доцент
Затверджено наказом університету від 25.08.2025р. № 65

2. Строк подання студентом роботи на кафедру: 15.12.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту:

- 1) Дані про умови роботи ґрунтообробного інструменту
- 2) Технічні умови на ремонт та відновлення деталей і агрегатів сільськогосподарського призначення
- 3) Матеріали науково-дослідної практики.
- 4) Нормативно – технологічна документація по способам підвищення зносостійкості ґрунтообробного інструменту
- 5) Результати літературного огляду і патентного пошуку.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Обґрунтування актуальності впровадження технології підвищення зносостійкості лоп культиваторів шляхом локального зміцнення леза
2. Огляд літературних джерел та патентно-інформаційних матеріалів щодо особливостей зношування і способів підвищення зносостійкості лоп культиваторів
3. Дослідження зносостійкості лоп культиваторів шляхом локального зміцнення леза
4. Розробка лопи культиватора з локально зміцненим лезом

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

6. Дата видачі завдання: 15 жовтня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Обґрунтування актуальності впровадження технології підвищення зносостійкості лап культиваторів шляхом локального зміцнення леза	1.11.2025	
2	Огляд літературних джерел та патентно-інформаційних матеріалів щодо особливостей зношування і способів підвищення зносостійкості лап культиваторів	15.11.2025	
3	Дослідження зносостійкості лап культиваторів шляхом локального зміцнення леза	1.12.2025	
4	Розробка лапи культиватора з локально зміцненим лезом	15.12.2025	
5	Підготовка публікації	15.12.2025	
6	Оформлення презентаційних матеріалів	20.12.2025	

Студент



Віталій ПІДГОРОДЕЦЬКИЙ

Керівник роботи



Максим ДИХА

РЕФЕРАТ

Обсяг пояснювальної записки – 83 сторінок, кількість рисунків - 44, таблиць - 1, додатків - 1, кількість джерел згідно із переліком посилань - 20.

Студент гр. МТВАм-24-1 Підгородецький В.В.

Тема «Технологічні особливості локального поверхневого зміцнення робочого інструменту для обробки ґрунту»

Дослідження, направлені на підвищення зносостійкості та зменшення енергоємності культиваторних лап, керування процесами зношування та опором переміщення їх в ґрунтовому середовищі, керування формою робочої поверхні в процесі експлуатації є актуальним і важливим для теорії і практики тертя та зношування.

Мета роботи полягає в підвищенні зносостійкості лап культиваторів шляхом обґрунтування форми та раціональних параметрів локального зміцнення леза.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Проаналізувати умови експлуатації і зношування лап культиваторів при взаємодії з абразивним середовищем та визначити напрямки підвищення їх зносостійкості.

2. Обґрунтувати геометричну форму лапи культиватора з умов мінімальності швидкості зношування та втрати на тертя при взаємодії з абразивним ґрунтовим середовищем.

3. Дослідити зношування поверхні локально зміцненого леза лапи культиватора і визначити періодичність розташування її неоднорідної структури;

4. Дослідити величини зносу та втрати на тертя лап культиватора з локальним зміцненням леза в процесі взаємодії з ґрунтовим середовищем.

5. Провести випробування культиваторних лап по визначенню впливу параметрів зміцнення на характер зносу при взаємодії з ґрунтом.

Перелік ключових слів: ґрунтообробний інструмент, культиваторна лапа, зносостійкість, дискретне зміцнення, надійність, випробування

Зміст

Вступ.....6

**1. ОБГРУНТУВАННЯ АКТУАЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ
ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЛАП
КУЛЬТИВАТОРІВ.....7**

1.1. Загальна характеристика об'єкта дослідження.....7

1.2. Формування теми та задачі дослідження.....26


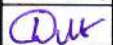


**2. ОГЛЯД -ІНФОРМАЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА
ОСОБЛИВОСТЕЙ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЛАП
КУЛЬТИВАТОРІВ.....28**

2.1. Сучасні конструкції, особливості зношування та
формування в процесі експлуатації робочих органів
культиваторів.....28

2.2. Ґрунт як чинник абразивного зношування культиваторних
лап.....35

2.3 Методи підвищення зносостійкості лап культиваторів.....40

2.4. Взаємодія лапи з ґрунтом та її вплив на триботехнічні
характеристики робочих поверхонь і тяговий опір.....49

КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.	Підгородецький			
Перевір.	Диха М.			
Н.контр.	Бабак			
Затвер	Диха О.			
Технологічні особливості локального поверхневого зміцнення робочого інструменту для обробки ґрунту				
		Літ.	Аркуш	Аркушів
ХНУ, гр. МТВАм-24-1				

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЛАП КУЛЬТИВАТОРІВ ШЛЯХОМ ЛОКАЛЬНОГО ЗМІЦНЕННЯ ЛЕЗА.....	53
3.1. Математичні моделі зношування поверхні леза лапи культиватора із періодичними ділянками локального зміцнення.....	53
3.2. Програма експериментальних досліджень.....	64
3.3. Результати експериментальних досліджень.....	66
4. РОЗРОБКА ЛАПИ КУЛЬТИВАТОРА З ЛОКАЛЬНО ЗМІЦНЕНИМ ЛЕЗОМ.....	72
4.1. Обґрунтування необхідності розробки.....	72
4.2. Вимоги, які ставляться до розробки.....	73
4.3. Будова і принцип роботи лапи культиватора з локально зміцненим лезом і пристрій для його здійснення.....	73
Висновки.....	77
Список використаних джерел.....	78
Доатки.....	80

ВСТУП

Однією з ключових проблем сучасного машинобудування є розроблення ефективних технологічних рішень, спрямованих на підвищення зносостійкості та зниження енергоємності роботи робочих органів машин, які під час експлуатації перебувають у тривалій взаємодії з абразивним ґрунтовим середовищем. У процесі роботи такі елементи зазнають інтенсивного абразивного зношування, особливо їх ріжучі кромки, що призводить до поступової втрати геометричної форми, збільшення тягового опору та витрат паливно-мастильних матеріалів, а також зумовлює необхідність періодичного відновлення або заміни зношених деталей.

Відсутність універсальних методичних рекомендацій щодо підвищення довговічності культиваторних лап спричиняє значну варіацію їх експлуатаційного ресурсу, який залежить від комплексу чинників: умов роботи, фізико-механічних властивостей ґрунту, геометричних параметрів леза, матеріалу робочих органів тощо. Незважаючи на значний обсяг проведених досліджень у напрямку підвищення зносостійкості робочих органів культиваторів, форма, розміри та просторові параметри зон локального зміцнення лез залишаються недостатньо вивченими. Їх оптимізація потребує поглибленого теоретичного аналізу й експериментального підтвердження з урахуванням закономірностей зношування та енергетичних втрат під час тертя в умовах абразивної дії ґрунтового середовища.

Таким чином, дослідження, спрямовані на підвищення зносостійкості та зменшення енергоємності культиваторних лап, а також на керування процесами зношування, силовими характеристиками руху в ґрунті й формуванням оптимальної конфігурації робочої поверхні під час експлуатації, є надзвичайно актуальними. Вони мають істотне значення як для розвитку теорії тертя та зношування, так і для вдосконалення практичних технологій зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин.

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

1. ОБГРУНТУВАННЯ АКТУАЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЛАП КУЛЬТИВАТОРІВ

1.1. Загальна характеристика об'єкта дослідження

Обробіток ґрунту — це сукупність технологічних процесів, спрямованих на зміну фізичного, механічного та агрономічного стану ґрунтового середовища внаслідок дії робочих органів сільськогосподарських машин і знарядь. Метою цих процесів є створення оптимальних умов для росту і розвитку культурних рослин у конкретних ґрунтово-кліматичних умовах.

На сучасному етапі розвитку агротехніки основними завданнями механічного обробітку ґрунту є:

- формування сприятливого водно-повітряного та теплового режимів у зоні кореневої системи рослин;
- забезпечення раціонального живлення культурних рослин шляхом рівномірного розподілу елементів живлення у просторі та часі;
- знищення бур'янів, шкідників і збудників хвороб;
- рівномірне переміщення та перемішування органічних і мінеральних добрив, а також рослинних решток у ґрунтовому шарі;
- запобігання ерозійним процесам (вітровій та водній ерозії), забезпечення екологічної безпеки агротехнічних прийомів.

Інтенсифікація аграрного виробництва потребує комплексного підходу до організації обробітку ґрунту, що передбачає врахування всіх технологічних, енергетичних і екологічних чинників для досягнення максимальної ефективності вирощування сільськогосподарських культур.

Залежно від агротехнічного призначення та строків виконання, обробіток ґрунту поділяють на такі основні види:

- основний,
- передпосівний (поверхневий),
- спеціальний.

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

Основний обробіток ґрунту — це найбільш енергоємний етап технологічного циклу, який передбачає глибоке розпушування орного шару з метою створення сприятливих умов для накопичення вологи, повітрообміну та розвитку кореневої системи. Його енергетична частка у структурі витрат становить близько 10–30 % від загальної кількості пального, використаного під час вирощування польових культур.

Основний обробіток ґрунту зазвичай здійснюється за допомогою лемішно-полицевих плугів, а також дискових і чизельних знарядь, що забезпечують різну глибину, інтенсивність та характер розпушування залежно від типу ґрунту та агротехнічних вимог.

Агротехнічні вимоги до лемішно-полицевого обробітку ґрунту

Плуг, як основне знаряддя для виконання глибокої оранки, повинен забезпечувати:

- глибину обробітку в межах 20–35 см;
- повне підрізання пласта ґрунту, його оборот і подрібнення до структурних агрегатів розміром 5–10 мм, частка яких має становити не менше 75 %;
- укладання подрібненого шару на дно борозни з рівномірним загортанням органічних решток і добрив на глибину 12–15 см.

Після проходження плуга кількість пилоподібних часток (менше 0,5 мм) не повинна збільшуватися, а частка грудок розміром 5–100 мм має бути не більшою ніж 5 %. Під час роботи плуга слід забезпечити стабільну глибину оранки з допустимим відхиленням не більше ± 2 см.

Органічні рештки та добрива повинні бути повністю загорнуті у ґрунт; допускається наявність неприорених решток на поверхні поля не більше 5 % від їх первинної кількості. Після оранки поверхня поля має бути рівною, без надмірних гребенів і борозен; максимальна висота гребенів і глибина борозен не повинна перевищувати 5 см.

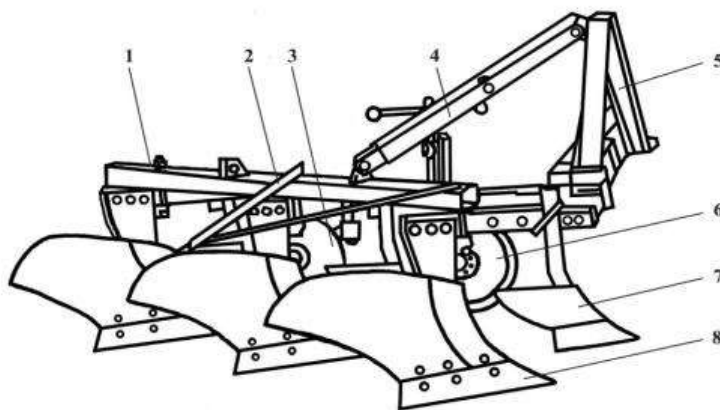
					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

Ширина захвату всіх корпусів плуга повинна бути однаковою, а допустиме відхилення від заданих значень не перевищує $\pm 10\%$.

Передплужники забезпечують підрізання приблизно $1/3$ ширини пласта і переміщують верхній шар ґрунту на дно борозни на глибину 8–12 см, сприяючи якісному перемішуванню верхнього шару з органічними залишками.

Начіпний трикорпусний плуг ПЛН-3-35 належить до категорії універсальних ґрунтообробних машин і призначений для виконання основного обробітку ґрунтів із питомим опором до 9 Н/см^2 . Конструкція плуга забезпечує ефективне розпушування та оборот орного шару ґрунту, не засміченого камінням чи іншими твердими включеннями. Машина використовується під час підготовки полів для вирощування зернових, овочевих та технічних культур, забезпечуючи формування якісного посівного шару.

Плуг агрегується з колісними або гусеничними тракторами тяглового класу 1,4, що дозволяє підтримувати оптимальні режими роботи, зокрема стабільну глибину оранки та раціональне енергоспоживання під час виконання



польових операцій.

Рис.1.1. Плуг лемішний начіпний ПЛН-3-35:

1 — рама; 2 — причіп для борін; 3 — дисковий ніж; 4 — розкіс; 5 — замок автозчіпки ; 6 — опорне колесо; 7 — передплужник; 8 — корпус

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

Начіпний плуг ПЛН-3-35 (рис. 1.1) є трикорпусною ґрунтообробною машиною, призначеною для виконання основного обробітку ґрунту з питомим опором до 9 Н/см². Конструкція плуга забезпечує формування орного шару необхідної глибини та якості, що відповідає агротехнічним вимогам до оранки під зернові, технічні та овочеві культури.

Плуг складається з таких основних вузлів: рами (1), корпусів (8), передплужників (7), дискового ножа (3), механізму опорного колеса (6) та начіпного пристрою. Загальна ширина захвату становить $3 \times 35 = 105$ см (або, за необхідності, 90 см), що забезпечує оптимальне співвідношення продуктивності та енергоспоживання під час польових робіт.

Робоча глибина оранки становить 18–30 см, а робоча швидкість руху агрегату — у межах 6–10 км/год.

Регулювання глибини обробітку здійснюється за допомогою гвинтового механізму опорного колеса, що забезпечує точність встановлення заданого режиму роботи.

Конструкція корпусу плуга

Корпус плуга (рис. 1.2, а) є основним робочим елементом, який безпосередньо взаємодіє з ґрунтом. Він складається з лемеша (1), полиці (2), польової дошки (5), що закріплені на башмаку, який, у свою чергу, приєднаний до стояка (3). Кожен елемент конструкції виконує чітко визначені функції, забезпечуючи комплексну дію на орний шар.

- Леміш призначений для підрізання скиби ґрунту і спрямування її на полицю. Залежно від умов роботи, на плугах встановлюють трапецієподібні або долотоподібні лемеші, що відрізняються геометрією ріжучої частини та впливають на характер зношування і якість різання.
- Полиця слугує для піднімання, перевертання та часткового подрібнення скиби ґрунту, забезпечуючи її рівномірне укладання у

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

борозну. Конфігурація полиці визначає траєкторію руху скиби, ступінь кришіння та якість обороту пласта.

- Польова дошка виконує функцію стабілізації руху корпусу, зменшує бічне зміщення плуга та сприяє підтриманню постійної глибини оранки.

Таким чином, конструкція плуга ПЛН-3-35 забезпечує високу якість оранки, стабільність параметрів обробітку та ефективне використання тягової потужності трактора. Завдяки універсальності та простоті налаштування плуг широко застосовується в системах основного обробітку ґрунту на різних типах сільськогосподарських угідь.

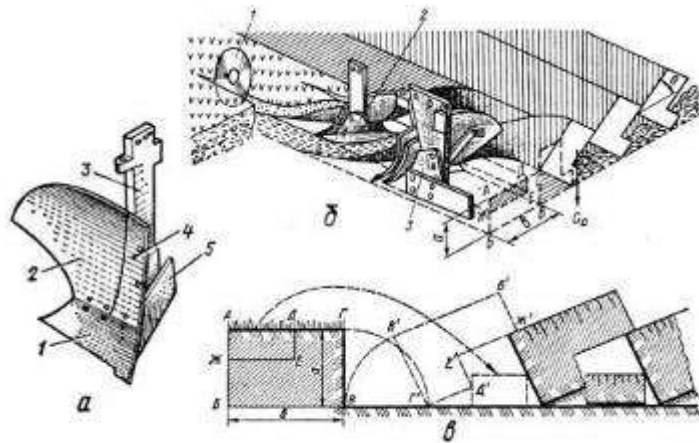


Рис.1.2. Робочий процес корпусу плуга ПЛН-3-35:

а — лемішно-полицевий корпус (1 - леміш; 2 - полиця; 3 - стояк; 4 - передня частина полиці; 5 - польова дошка); б - робочий процес корпусу з передплужником (1 - дисковий ніж; 2 - полиця; 3 - корпус плуга; а - глибина оранки; б - ширина скиби); в - схема перевертання скиби

Функціонування основних і допоміжних елементів корпусу плуга

Польова дошка виконує роль опорного елемента корпусу плуга, який взаємодіє з дном і стінкою борозни. У процесі оранки вона стабілізує положення корпусу, запобігаючи його бічному зміщенню, що виникає під

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

дією горизонтальних реакційних сил ґрунту. Завдяки цьому забезпечується стала ширина захвату та рівномірність глибини обробітку.

Стояки плуга можуть мати різну конструкцію залежно від технологічного призначення та умов експлуатації: литу, штамповану або зварно-штамповану. Вибір конструкції стояка визначається необхідною міцністю, жорсткістю та технологічністю виготовлення.

Передплужник і його функції

Передплужник є допоміжним робочим органом, конструктивно виконаним у вигляді зменшеного корпусу культурного типу. Його призначення полягає у попередньому підрізання верхнього шару пласта ґрунту з боку польового обрізу основного корпусу. Товщина цієї скиби становить 8–12 см, а ширина захвату — приблизно дві третини від ширини захвату основного корпусу.

Передплужник обертає та укладає знятий шар на дно борозни, що сприяє повнішому перевертання пласта основним корпусом і забезпечує кращу заробку рослинних решток.

Ніж і його різновиди

Ніж виконує функцію вертикального різання пласта ґрунту з боку борозни, полегшуючи роботу лемеша та забезпечуючи чистоту лінії розрізу. Залежно від типу плуга та умов експлуатації застосовують дискові або череслові ножі.

- Дискові ножі використовують переважно на плугах загального призначення. Робочою частиною є сталевий диск із загостреним ріжучим краєм, який під час руху перекочується по поверхні поля та розрізає ґрунт у вертикальній площині.
- Череслові ножі застосовують на спеціалізованих плугах, що працюють у складних умовах, зокрема при значному засміченні або підвищеній вологості ґрунту.

Технологічний процес оранки

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Технологічний процес обробітку ґрунту лемішно-полицевим плугом (рис. 1.2, б) здійснюється завдяки взаємодії основних робочих органів — лемеша та полиці, а також допоміжних елементів — польової дошки й стояка.

На початковому етапі леміш підрізує пласт ґрунту на заданій глибині, відділяючи його від стінки борозни. Далі пласт переміщується по робочій поверхні полиці, де розпушується, перевертається та відкидається у бік зораного поля.

Ступінь подрібнення ґрунту залежить від форми грудини полиці, тоді як якість перевертання пласта визначається конфігурацією крила відвалу. У результаті оптимальної взаємодії робочих органів утворюється структурний ґрунтовий шар із агрегатами розміром 1–3 мм, а пласт, повернутий на 180°, вважається показником ідеального обробітку.

Польова дошка, взаємодіючи зі стінкою борозни, створює реактивну силу, що компенсує бічний тиск ґрунту на корпус плуга, зумовлений його несиметричною будовою. Це забезпечує прямолінійний рух агрегату та сталість траєкторії під час оранки.

Таким чином, процес оранки лемішно-полицевими плугами охоплює чотири послідовні технологічні операції:

1. різання пласта ґрунту;
2. перевертання;
3. розпушення;
4. відкидання скиби.

Багатокорпусні плуги

Для обробітку великих площ та підвищення продуктивності використовують напівначіпний дев'ятикорпусний плуг ПТК-9-35 (рис. 1.3), призначений для оранки ґрунтів різного механічного складу під різноманітні культури. За необхідності роботи на важких або щільних ґрунтах конструкцію плуга переобладнують у восьмикорпусний варіант — шляхом

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

демонтажу дев'ятого корпусу з передплужником і встановлення дискового ножа перед восьмим корпусом. Така модифікація дозволяє зменшити тяговий опір і забезпечити стабільність глибини обробітку.

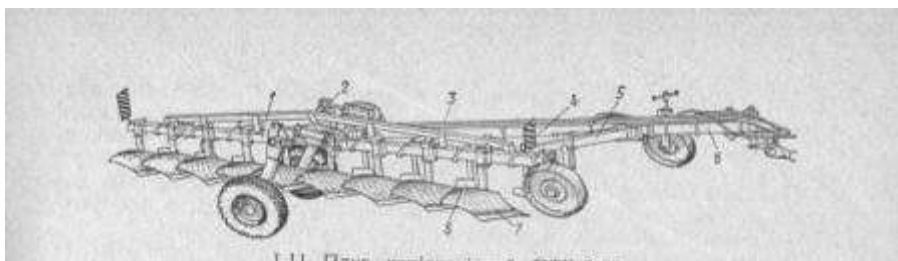


Рис.1.3. Плуг напівначіпний ПТК – 9-35:

- 1 – основний брус; 2 – транспортний механізм; 3 – маслопроводи;
 4 – поздовжній брус; 5 – поперечний брус; 6 – начіпний пристрій;
 7 – корпус; 8 – передплужник.

Транспортний механізм слугує для переведення плуга з робочого положення у транспортне і навпаки, забезпечуючи безпечне переміщення агрегату між робочими ділянками.

До складу механізму входять два пневматичні колеса, колінчасті осі та гідроциліндри, які утворюють єдину кінематичну систему. Зміна положення плуга здійснюється за допомогою двох гідроциліндрів, що забезпечують плавне піднімання або опускання рами.

Під час виконання оранки праве колесо перебуває у піднятому положенні над зораною поверхнею, тоді як ліве котиться по незораній частині поля, стабілізуючи роботу плуга.

Регулювання глибини оранки здійснюється двома незалежними механізмами:

- основна глибина встановлюється механізмом регулювання лівого пневматичного колеса;
- глибина ходу переднього корпусу коригується гвинтовим механізмом правого переднього опорного колеса.

Плуг ПТК-9-35 агрегатується з тракторами високої потужності класу 5, зокрема К-700, К-700А та К-701, що забезпечують достатню тягову силу для роботи з багатокорпусними знаряддями. Така комбінація технічних засобів

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

дозволяє підтримувати сталу робочу швидкість і зменшити питомі енергетичні витрати під час виконання технологічного процесу.

1.5. Глибокорозпушувач-підживлювач КПП-2,2

Глибокорозпушувач-підживлювач КПП-2,2 (рис. 1.4) призначений для виконання основної обробки ґрунту на глибину до 30 см без обертання скиби, що особливо важливо за умов вітрової ерозії.

Машина забезпечує розпушення ґрунту з одночасним внесенням мінеральних добрив у зону кореневмісного шару, що сприяє підвищенню ефективності використання поживних речовин.

У процесі роботи глибокорозпушувача на поверхні поля зберігається близько 75% стерні, що істотно зменшує швидкість вітрових потоків біля поверхні ґрунту та попереджає розвиток дефляційних процесів. Такий підхід поєднує елементи ресурсозбереження та екологізації технологій обробки ґрунту, сприяючи підвищенню родючості орного шару та збереженню природної структури ґрунтового покриву.

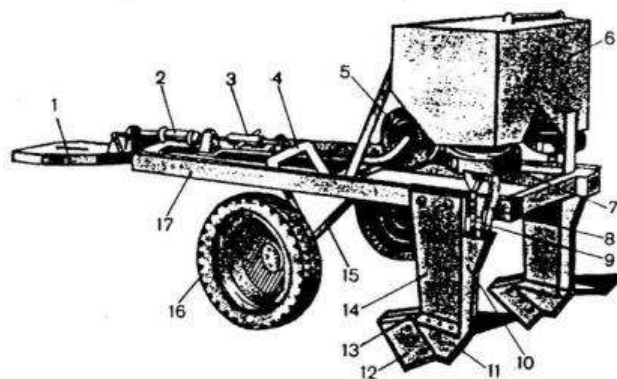


Рис.1.4. Культиватор-глибокорозпушувач-підживлювач КПП-2,2:

1 – причіпний пристрій; 2 – гідроциліндр; 3 – регулятор глибини; 4 – піввісь; 5 – вентилятор; 6 – бункер; 7 – туковисівний апарат; 8 – тукопровід; 9 – повітропровід; 10 – змішувач; 11 – розподільник; 12 – лемеш; 13 – долото; 14 – плоскорізальна лапа; 15 – карданний вал; 16 – опорно-приводне колесо; 17 – рама.

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Глибокорозпушувач-підживлювач КПП-2,2 (рис. 1.4) є комбінованою ґрунтообробною машиною, призначеною для глибокого розпушення ґрунту без обороту пласта з одночасним внесенням мінеральних добрив у зону кореневмісного шару. Конструкція агрегату забезпечує зменшення втрат вологи, збереження стерні на поверхні поля (до 75 %) і запобігання вітровій ерозії ґрунтів.

Машина складається з таких основних вузлів: двох плоскорізальних лап (14) із шириною захвату по 110 см кожна, бункера для добрив (6) місткістю 450 кг, дискових туковисівних апаратів (7), вентилятора (5), рами (17), причіпного пристрою (1) та пари опорно-приводних коліс (16).

Кожна плоскорізальна лапа (14) має у своєму складі два лемеші (12), долото (13), змішувач (10) і розподільник добрив (11). Лапи здійснюють підрізання та розпушення ґрунту на глибину до 25 см, створюючи сприятливі умови для аерації й накопичення вологи.

Туковисівні апарати дискового типу встановлено в днищі бункера. Їх робочий привід здійснюється від опорно-приводних коліс (16), що обертаються під час руху агрегату. Отримані від апаратів дози добрив через тукопроводи (8) надходять до робочих органів лап.

Система пневмотранспорту включає вентилятор, який приводиться у дію гідромотором. Повітря, що подається через повітропровід (9), захоплює частинки добрив у змішувачі (10) і транспортує їх до розподільника (11). Розподільник рівномірно подає добрива по всій ширині захвату лапи, спрямовуючи їх на дно борозни. У процесі руху ґрунт, знятий лемешами, закриває внесені добрива, забезпечуючи їх включення в орний шар. Частина повітря, що залишилася після подачі суміші, виходить в атмосферу, тоді як решта заповнює поровий простір у ґрунті, сприяючи покращенню його структурного стану.

Ширина захвату культиватора становить 2,15 м, а робоча швидкість – до 10 км/год. Агрегатування здійснюється з тракторами тягових класів 3 і 4, що

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

забезпечують достатній рівень тягового зусилля для стабільної роботи навіть у важких ґрунтових умовах.

Оборотний плуг фірми Vogel & Noot (рис. 1.5) належить до сучасних енергоефективних ґрунтообробних машин і призначений для виконання полицевої гладенької оранки на глибину до 30 см під культури I та II технологічних груп. Машина агрегується з тракторами класу 2–3, що забезпечує її ефективне використання у середніх і великих господарствах.

Плуг має чотири пари корпусів, розташованих дзеркально – ліво- та правообертальних. Ширина захвату одного корпусу регулюється в межах 32...44 см, що дозволяє адаптувати параметри оранки до типу ґрунту й агротехнічних вимог. Конструкція включає раму (1), на якій розміщені корпуси (2) з передплужниками (3), башту (4) – механізм для обертання рами й приєднання плуга до трактора, а також опорно-транспортне колесо (5). Система обертання рами забезпечує зміну напрямку обороту пласта без необхідності розвороту агрегату, що істотно скорочує непродуктивний час і підвищує продуктивність оранки.

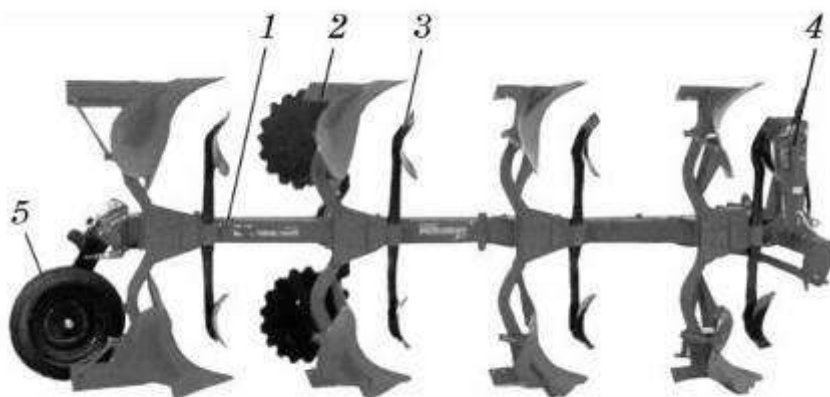


Рис.1. 5. Оборотний плуг VN-Euromat:

- 1 — рама; 2 — пара корпусів; 3 — пара передплужників;
- 4 — башта; 5 — перекидне опорно транспортне колесо

Щодо технологічного процесу гладенької оранки, що здійснюється оборотними плугами, то він принципово не відрізняється від оранки плугом-

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

лушительником або плугом загального призначення. Головною відмінністю оборотного плуга є можливість його роботи човниковим способом, який забезпечує виконання оранки без згонів та розгінних борозен, притаманних загінним плугам. Оборотний плуг конструктивно має два комплекти корпусів (право- та лівообертальних) на одній рамі, яка може обертатися на 180°. Отже, загальна металомісткість оборотного плуга в 1,3 – 1,6 раза вища, ніж загінного. Водночас гладенька оранка сприяє швидкому вирівнюванню полів, оскільки не залишає на 10...15 % поверхні поля огріхів, притаманних звичайній оранці.

Начіпний (напівначіпний) оборотний плуг прикріплюється до трактора за допомогою башти, до якої шарнірно приєднані гідроциліндр, що повертає раму з корпусами, та власне рама. Плуг повертає тракторист-машиніст із кабіни трактора за допомогою гідросистеми. Культиватор – 9 (рис.1.6,а) призначен для основного та передпосівного обробітку ґрунту на глибину до 18 см з максимальним збереженням стерні та інших пожнивних решток, щоб захистити ґрунт від ветрової ерозії. Конструкція культиватора складається із трьох секцій – середньої центральної 9 і двох бокових 4 і 8. Середня секція 9 має раму, в передній частині якої змонтований замок автозчіпки 5, три плоскорізальних лапи шириною захвату 0,97 м кожна і двоє опорних пневматичних коліс 2.

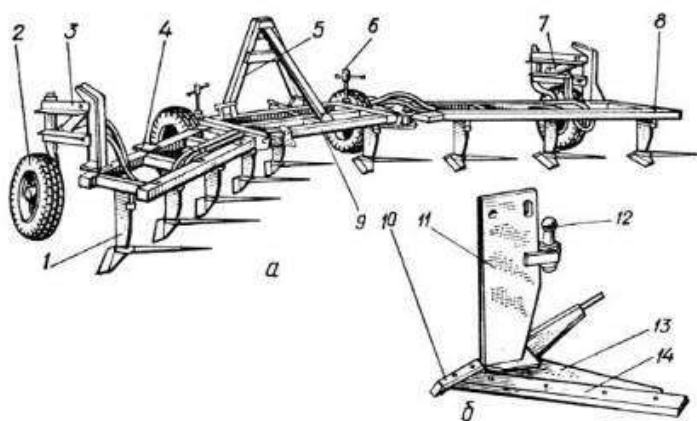


Рис.1.6. Культиватор - плоскоріз широкозахватний КПШ – 9:

а – загальний вид; б – плоскорізальна лапа; 1 – лапа; 2 – опорне колесо; 3 – підвіска; 4 – ліва бокова секція; 5 – замок автозчіпки; 6 – гвинтовий

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

механізм; 7 – гідроциліндр; 8 – права бокова секція; 9 – середня секція; 10 – долото; 11 – стояк; 12 – регулювальний болт; 13 – башмак; 14 – леміш.

Плоскорізальна лапа (рис.1.6.б) складається з лемішів 14, башмака 13, долота 10 і стояка 11 з регулювальним болтом 12.

Глибину обробітку (до 18 см) регулюють гвинтовими механізмами опорних коліс середньої секції. Ширина захвату культиватора 6,4 і 8,2 м. Робоча швидкість до 12 км/год. Агрегатують с тракторами класу 3 і 5.

Плуг чизельний ПЧ-2,5 (рис.1.7) призначений для розпушення ґрунту з поглибленням орного шару, безполицевого обробітку ґрунту та для глибокого схилів.

Робочими органами плуга є стрілчасті і долотоподібні лапи. Розміщують їх на рамі з кроком 40 і 50 см. Глибина обробітку стрілчастими лапами 20 – 30 см, долотоподібними 30 – 45 см.

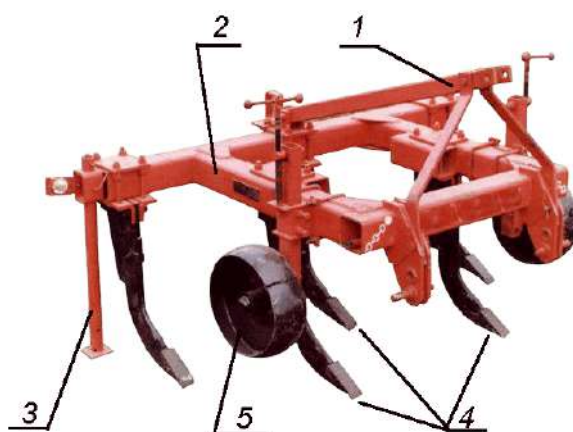


Рис.1.7. Плуг чизельний ПЧ-2,5:

1 – начіпний пристрій; 2 – рама; 3 – підставка; 4 – робочі органи; 5 – опорне колесо

Плуг чизельний ПЧ-2,5 складається з п'яти робочих органів 4, рами 2 з начіпним пристроєм 1, двох опорних коліс 5 та підставок 3. На рамі плуга можуть встановлюватись долотоподібні або стрільчасті лапи. Робочі органи розміщені в два ряди. При роботі плуга долото розпушувача шириною 70 мм підрізує і піднімає в верх шар ґрунту, а стояк та обтічники розсувають його і

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

розпушують. Стрільчасті лапи мають ширину захвату 270 мм. Встановлюють їх для підрізування бур'янів та більш інтенсивного розпушування ґрунту. Глибина обробітку регулюється гвинтовими механізмами опорних коліс.

Ширина захвату плуга 2,5 м. Робоча швидкість до 5-8 км/год. Агрегатують с тракторами Т-150, ХТЗ-17221.

Залежно від технологічних операцій, що виконують машини для передпосівного обробітку ґрунту їх поділяють на культиватори, борони, котки, луцильники та ін. Окрему групу складають комбіновані агрегати, які за один прохід створюють декілька простих технологічних операцій. Вони розпушують ґрунт, вносять мінеральні добрива, подрібнюють грудки, прикотковують ґрунт тощо.

Агротехнічний захід, який забезпечує кришіння, розпушування і часткове перевертання ґрунту, а також повне знищення бур'янів і вирівнювання поверхні поля, називається культивацією. Виконують її культиваторами. Якщо ґрунт розпушують без перевертання на глибину понад 12 см, такий обробіток називають глибоким розпушуванням і виконують його культиваторами-плоскорізами або чизель-культиваторами.

За призначенням розрізняють культиватори для суцільного обробітку ґрунту (парові), міжрядного обробітку ґрунту (просапні) і для обробітку ґрунтів, що підлягають вітровій і водній ерозії.

До культиваторів для суцільного обробітку ґрунту належать парові культиватори, призначені для догляду за парами і передпосівного обробітку ґрунту; культиватори-плоскорізи для розпушування полів, вкритих стернею, на глибину до 16 см; штангові культиватори для знищення кореневищних бур'янів; культиватори-розпушувачі, а також садові і лісові культиватори.

При суцільному обробітку ґрунту поверхня поля має бути рівною, без гребенів і борозен. Розпушувати ґрунт треба так, щоб вологі шари не потрапляли на поверхню, а частинки не розпилювалися і не ущільнювалися. Відхилення від заданої глибини обробітку ґрунту — не більше ± 1 см. Робочі

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

органи культиватора мають знищувати не менш як 98-99% бур'янів і не пошкоджувати рослин. Висота гребенів розпушеного шару не повинна перевищувати 3-4 см.

Робочі органи культиваторів – це універсальні стрілчасті і розпушувальні лапи. Наконечник стрілчастої універсальної лапи прикріплений до жорсткого стояка. Кут нахилу леза до горизонтальної площини – 23-30°. Кут між лезами – 60-65°, ширина захвату – 270 і 330 мм. Універсальні лапи добре розпушують ґрунт і підрізають корені бур'янів. Лапи використовують для обробітку ґрунту на глибину до 12 см. Носки розпушувальних лап мають два різальні леза з кутом між ними 60-70°. Лапи з жорсткими стояками з шириною захвату 35-65 мм використовують для обробітку ґрунту в садах і виноградниках на глибину до 25 см.

Культиватор КПС-4 (рис.1.8) призначений для суцільного передпосівного розпушування ґрунту і підрізування бур'янів з одночасним боронуванням на швидкості до 12 км/год. Ширина захвату – 4 м, глибина обробітку — 5-12 см. Один культиватор агрегують з тракторами тягового класу 0,9-1,4.

Основні вузли культиватора (рис.1.8а): зварна рама 4, сниця, що зібрана з центрального 11, бокових 1, 12 брусів, опорні колеса 3 з гвинтовим механізмом 2 регулювання глибини ходу робочих органів, гряділі 5 з лапами 6, пристосування 8 з повідцями для начіпки борін, з'єднувальний шарнір для комплектування шеренгового агрегату, гідроциліндр 10 і причіп 13.

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

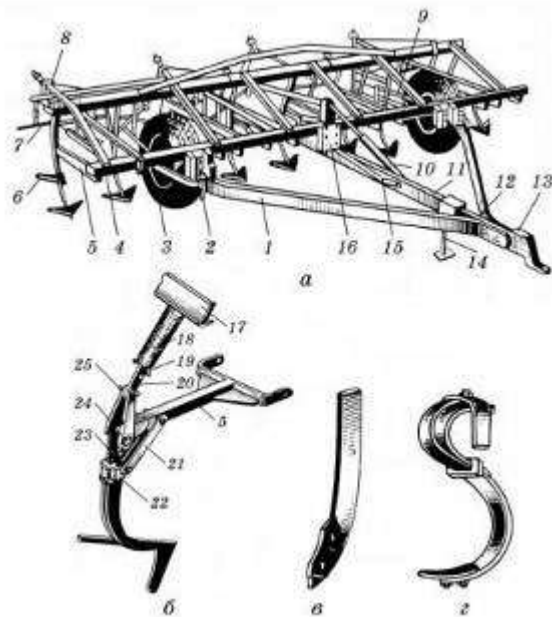


Рис.1.8. Культиватор КПС-4:

а – загальний вигляд; б – стрілочаста лапа; в і г – розпушувальні лапи;
 1 і 12 – бокові бруси сніці; 2 – регулятор глибини; 3 – опорне колесо;
 4 - рама; 5 і 9 – гряділі; 6 – лапа; 7 – повідець; 8 – начіпка для борін;
 10 – гідроциліндр; 11 – центральний брус сніці; 13 – причіп;
 14 – підставка; 15 – транспортна тяга; 16 - стояк; 17 - кутник лапи;
 18 - пружина; 19 - шплінт; 20 – штанга; 21 – планка; 22 – тримач;
 23 - 25 – болтові з'єднання.

Для забезпечення якісного обробітку слабкозабур'ячених полів у передньому ряду культиватора на коротких гряділях установлюють робочі органи з шириною захвату 270 мм, тоді як у задньому ряду, закріпленому на довгих гряділях, застосовують лапи із шириною захвату 330 мм. Для гарантування повного підрізування кореневої системи бур'янів різальні леза задніх лап мають перекривати леза передніх на 4–5 см з кожного боку.

У разі обробітку полів із підвищеним ступенем забур'яненості на коротких і довгих гряділях встановлюють лапи однакової ширини захвату — 330 мм.

Розпушувальні лапи культиватора розташовують у трьох поперечних рядах. На коротких гряділях монтують по одній лапі, тоді як на довгих, за допомогою спарених тримачів, — по дві. Відстань між сусідніми борозенками становить 16,6 см. Глибину обробітку ґрунту регулюють

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

гвинтовими механізмами (поз. 2), змінюючи положення опорних коліс відносно рами по висоті.

Під час встановлення культиватора на необхідну глибину обробітку виконують такі операції:

1. Раму агрегату вирівнюють паралельно до поверхні майданчика шляхом регулювання довжини розкосів і верхньої центральної тяги навіски трактора.
2. Культиватор розміщують симетрично відносно поздовжньої осі трактора та фіксують у цьому положенні за допомогою ланцюгових розтяжок нижніх тяг навіски.
3. Під опорні колеса встановлюють підкладки, висота яких на 2–3 см менша за задану глибину обробітку, що враховує ступінь занурення коліс у ґрунт.
4. Робочі органи регулюють таким чином, щоб леза по всій довжині контактували з поверхнею майданчика.

Культиватор КРН-5,6 (рис. 1.9) призначений для міжрядного обробітку та внесення добрив у восьмирядні посіви кукурудзи, соняшнику та інших культур із міжряддями 60 і 70 см. Агрегат забезпечує виконання широкого спектра операцій, зокрема:

- міжрядний обробіток прополювальними лапами у двох напрямках на глибину 6–10 см;
- розпушування ґрунту долотоподібними робочими органами на глибину 10–16 см;
- внесення мінеральних добрив на глибину до 16 см;
- підгортання та формування поливних борозен із одночасним внесенням добрив;
- обробку рядків голчастими дисками та лапами-полічками;
- передпосівний обробіток ґрунту на глибину до 12 см.

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Таким чином, конструктивно-технологічні особливості культиватора КРН-5,6 забезпечують універсальність його застосування при догляді за просапними культурами та ефективно поєднання технологічних операцій у межах одного робочого циклу.

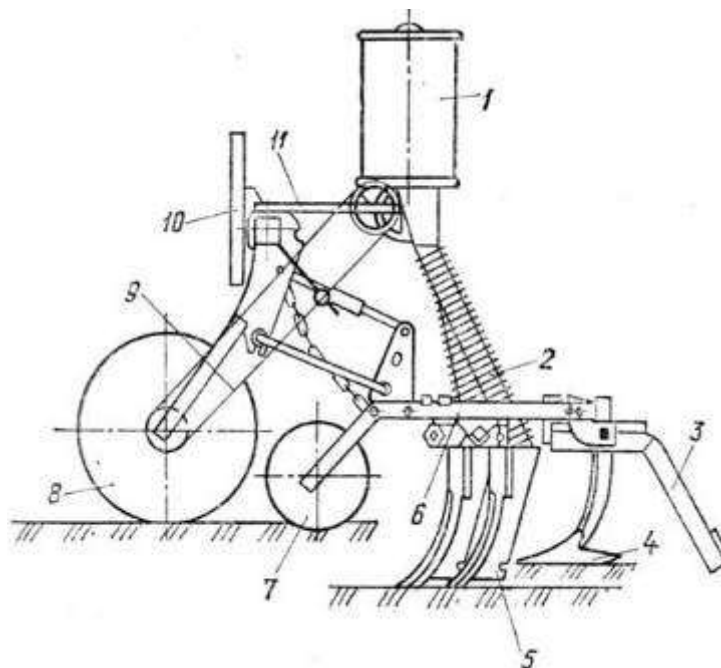


Рис.1.9. Схема культиватора-рослинопідживлювача КРН-5,6Б з підживлювальним пристроєм:

1 – туковисівний апарат АТД-2; 2 –тукопровод; 3- підніжна площадка;
 4 – стрілчаста лапа; 5 – підживлювальний ніж; 6 – секція робочих органів; 7 – опорний коток секції; 8 – опорне колесо культиватора; 9 – ланцюгова передача; 10 – замок навіски; 11 – кронштейн туковисівного апарату.

Основними складальними вузлами культиватора є сім секцій робочих органів (рис. 1.10), до складу яких входять плоскорізальні прополювальні лапи (бритви), стрілчасті лапи, розпушувальні зуби та підживлювальні пристрої. Така компоновка забезпечує можливість виконання широкого спектра технологічних операцій з обробітку міжрядь та внесення мінеральних добрив.

До комплексу змінних і допоміжних робочих органів входять голчасті диски, прополювальні борінки, підгортачі, лапи-полічки, а також захисні щитки-халабудки, призначені для запобігання засипанню рослин ґрунтом під час роботи агрегату на підвищених робочих швидкостях (8–9 км/год). Наявність зазначених елементів підвищує технологічну гнучкість культиватора, дозволяючи адаптувати його до різних агротехнічних умов і стадій розвитку рослин.

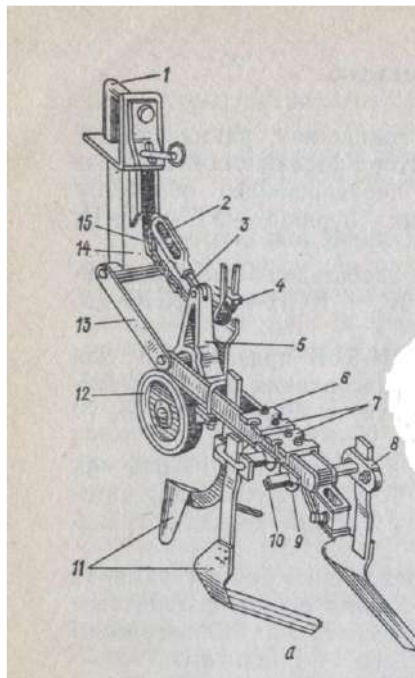


Рис.1.10. Секція робочих органів культиватора КРН -5,6 Б:

1 – скоба; 2 – стяжна гайка; 3 – верхня ланка; 4 – важіль регулятора глибини; 5 – задній кронштейн; 6 – гряділь; 7 – накладки; 8 – тримач лапи; 9 – призма; 10 – брус; 11 – лапи; 12 – копіювальне колесо; 13 – нижня ланка підвіски; 14 – передній кронштейн; 15 – ланцюг

На культиваторі встановлено вісім туковисівних апаратів типу АТД-2, призначених для подачі мінеральних добрив через тукопроводи безпосередньо до підживлювальних ножів. Кожна секція культиватора оснащена опорним котком і паралелограмною підвіскою, що забезпечує

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

стабільне копіювання рельєфу поверхні поля та підтримання сталої глибини обробітку.

Привід туковисівних апаратів здійснюється від опорно-приводних коліс за допомогою ланцюгової передачі, що забезпечує синхронізацію подачі добрив із поступальним рухом агрегату.

Регулювання глибини ходу робочих органів секції виконується через механізм копіювального колеса за допомогою важеля регулятора глибини.

Основні технічні характеристики культиватора: ширина захвату – 5,6 м; робоча швидкість – до 10 км/год; маса – 1300 кг; експлуатаційна продуктивність – 4,4 га/год. Культиватор агрегується з тракторами тягового класу 14 кН.

1.2. Формування теми та задачі дослідження

Питанням взаємодії робочих органів ґрунтообробних машин із ґрунтовим середовищем присвячено праці багатьох учених.

Водночас у більшості робіт недостатньо уваги приділено питанням зміни геометричної форми робочих органів у процесі експлуатаційного зношування та методам підвищення їх зносостійкості.

Проведений аналітичний огляд показав, що сучасні підходи до підвищення довговічності культиваторних лап орієнтовані переважно на використання нових матеріалів, застосування термічної та хіміко-термічної обробки, а також нанесення зміцнювальних покриттів. Ці методи уповільнюють процес зношування робочих поверхонь, проте не усувають проблему нерівномірного зношування окремих ділянок та втрати початкової геометрії леза, що суттєво впливає на якість обробітку ґрунту.

Встановлено, що зменшення інтенсивності зношування може бути досягнуто шляхом оптимізації геометричної форми різальної частини лапи та обґрунтування параметрів її локального зміцнення. Такий підхід дозволяє

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

підвищити експлуатаційну стійкість робочих органів без істотного збільшення матеріальних витрат.

Мета та завдання дослідження

Мета роботи полягає у підвищенні зносостійкості лап культиваторів шляхом обґрунтування раціональної форми леза та параметрів його локального зміцнення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **науково-технічні завдання**:

1. Провести аналіз умов експлуатації та механізмів зношування лап культиваторів під час взаємодії з абразивним ґрунтовим середовищем і визначити напрями підвищення їх зносостійкості.
2. Обґрунтувати геометричну форму робочої частини лапи культиватора з урахуванням мінімізації швидкості зношування та енергетичних втрат при терті з ґрунтом.
3. Дослідити процес зношування поверхні леза з локальним зміцненням і визначити оптимальну періодичність розташування зон неоднорідної структури.
4. Визначити величини зносу та енергетичні втрати робочих органів із локально зміцненими лезами під час взаємодії з ґрунтовим середовищем.
5. Провести експериментальні випробування культиваторних лап для встановлення впливу параметрів локального зміцнення на характер та інтенсивність їх зношування.

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

2. ОГЛЯД -ІНФОРМАЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЛАП КУЛЬТИВАТОРІВ

2.1. Сучасні конструкції, особливості зношування та формоутворення в процесі експлуатації робочих органів культиваторів

Проблему підвищення зносостійкості робочих органів культиваторів доцільно розглядати з урахуванням конструктивних особливостей машин та характеру їх взаємодії з абразивним середовищем, яким виступає ґрунт.

Інтенсивність зношування робочих поверхонь лап культиваторів визначається комплексом чинників, серед яких основними є: геометричні параметри робочого органа, фізико-механічні властивості матеріалу, технологія зміцнення різальних крайок, а також склад і абразивність ґрунту. Залежно від поєднання цих факторів швидкість руйнування поверхневого шару може варіюватися в широких межах.

Отже, ефективне вирішення проблеми підвищення довговічності лап культиваторів вимагає системного аналізу сучасних конструкцій, умов їх експлуатації, закономірностей зміни геометрії під час зношування та методів підвищення стійкості до абразивного впливу. На цій основі можна сформулювати перспективні напрями вдосконалення конструкцій робочих органів і зниження енергоємності процесу обробітку ґрунту.

У структурі засобів механізації, що застосовуються в сільськогосподарському виробництві, культиватори займають провідне місце за кількістю різновидів і форм робочих органів. Їх використовують для розпушування ґрунту, знищення бур'янів, передпосівного обробітку та догляду за парами.

В агропромисловому комплексі України найбільшого поширення набули культиватори для міжрядного та суцільного обробітку ґрунту, які комплектуються різними типами робочих органів залежно від технологічного

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

призначення. Найпоширенішим типом є стрілчасті лапи, основні параметри яких регламентуються галузевим стандартом .

Відповідно до цього стандарту, передбачено 21 типорозмір універсальних стрілчастих лап, призначених для використання на культиваторах різного типу. Для машин суцільного обробітку, зокрема культиваторів КПС-4, застосовують лапи шириною захвату 270 та 330 мм, які встановлюються у два ряди за спеціальною схемою з перекриттям, що забезпечує суцільне підрізання бур'янів. Робоча глибина ходу таких лап становить 0,06–0,15 м.

Найпростішою за конструкцією є однорідна стрілчаста лапа (рис. 2.1), виготовлена з листового прокату. Основними її перевагами є технологічність виробництва, ремонтпридатність та відносно невисока собівартість. Разом із тим, така лапа має певні експлуатаційні обмеження, пов'язані зі швидким зношуванням різальних крайок і поступовою втратою оптимальної геометричної форми, що негативно впливає на якість обробітку ґрунту та збільшує енерговитрати агрегату.

Конструкція типового робочого органа — стрілчастої лапи для суцільного обробітку ґрунту — наведена на рис. 2.1. Її основними елементами є корпус, стійка, ріжучі крайки та центральне лезо. Форма і кут нахилу ріжучих крайок визначають не лише характер взаємодії лапи з ґрунтом, але й рівень сил тертя, величину опору руху та швидкість абразивного зношування.

Таким чином, аналіз існуючих конструкцій свідчить, що ефективність роботи культиваторних лап залежить не тільки від матеріалу, а й від раціональної геометрії робочої частини, яка визначає умови формоутворення під час експлуатації. Це підкреслює актуальність подальших досліджень, спрямованих на обґрунтування конструктивних параметрів і технологій локального зміцнення, що забезпечують зниження інтенсивності зношування різальних елементів.

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

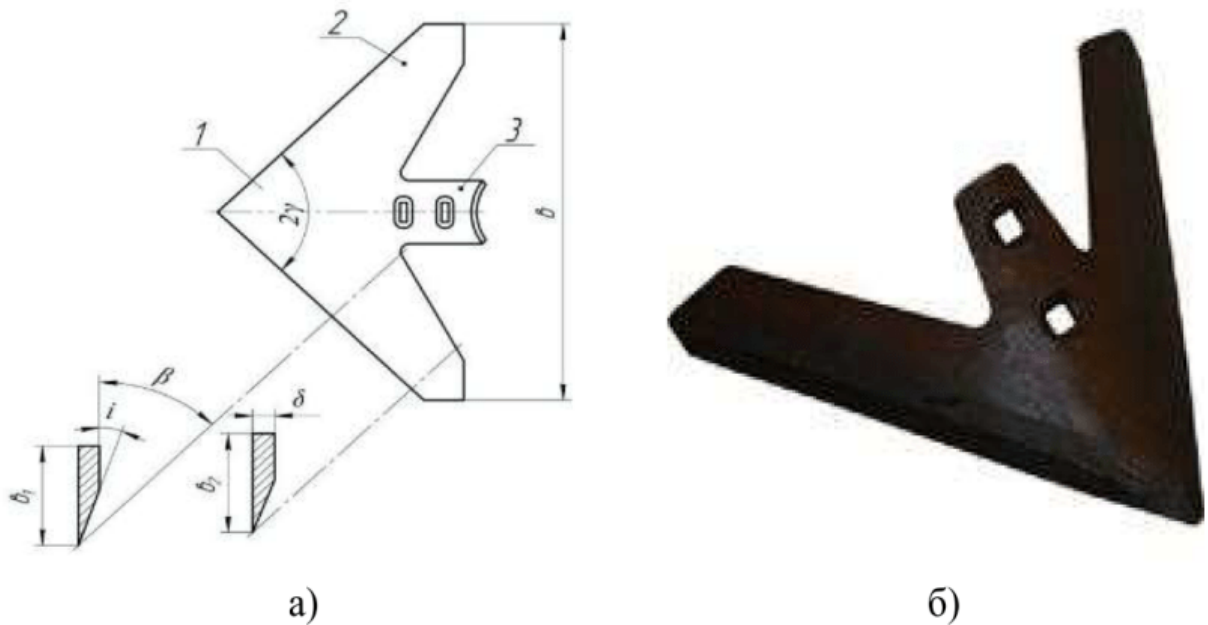


Рис. 2.1. Стрілчаста лапа культиватора:

а - схема лапи: 1 - носова частина; 2 - крило; 3 - хвостовик; б - загальний вид

Основні конструктивні параметри та вимоги до стрілчастих лап культиваторів

До основних конструктивних параметрів, за якими класифікують і виготовляють стрілчасті лапи, належать: ширина захвату (b), кут розхилу (2γ), кут кришення (β), ширина крил (b_1 і b_2), товщина матеріалу (δ) та кут загострення ріжучої кромки (i), який визначає якість заточування.

Параметр ширини захвату обирають залежно від розташування лап на рамі культиватора, типу обробітку ґрунту (суцільного чи міжрядного), а також з урахуванням глибини заглиблення та ефективності рихлення [15]. Максимально допустима ширина захвату (b_{\max}) обмежується міцністю конструкції лапи й залежить від товщини матеріалу (δ). Згідно з діючими нормативами [16], для типових розмірів лап встановлені наступні параметри: кут розхилу $2\gamma = 65^\circ$, кут кришення $\beta = 28^\circ$.

Товщина металу (δ) визначається вимогами до міцності та експлуатаційної надійності й узгоджується з шириною захвату. Як основний

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

матеріал для виготовлення стрілчастих лап застосовують високовуглецеву пружинну сталь марки не нижче 65Г (ГОСТ 14959–89), що забезпечує необхідну твердість та опір абразивному зносу.

Відповідно до технічних вимог, твердість ріжучої кромки лапи, виготовленої без наплавлення зносостійкого шару, після термічної обробки повинна становити 44–45 HRC у зоні гарту та не перевищувати 352 HB у незагартованій ділянці.

Форма та спосіб заточування визначаються величиною кута кришення (β) (рис. 2.2). Для лап із кутом $\beta < 15^\circ$ застосовується верхнє заточування (рис. 2.2, а); при $\beta > 25^\circ$ — нижнє заточування (рис. 2.2, б); у разі проміжних значень $15^\circ < \beta < 25^\circ$ — комбіноване заточування (рис. 2.2, в). Оптимальний кут загострення леза (i) становить $12\text{--}15^\circ$, при цьому необхідно забезпечити кут зазору $\varepsilon \geq 10^\circ$ між ріжучою крайкою та поверхнею ґрунту. Допустима товщина леза після заточування не повинна перевищувати 0,3 мм [10].

Для забезпечення ефекту самозагострювання під час експлуатації ріжучу кромку виконують двошаровою: на основний метал лапи з тильної сторони наплавляють зносостійкий сплав (наприклад, сормайт). Товщина такого наплавленого шару становить $0,4 \pm 0,25$ мм. Хоча твердість шару стандартом не регламентується, товщина ріжучої крайки після наплавлення не повинна перевищувати 0,5 мм. Заточування проводять із боку основного металу до появи шару наплавки.

Вимоги до якості обробки леза передбачають, що хвилястість крайки не повинна перевищувати 2 мм, а нерівність ріжучої лінії за висотою — 0,4 мм. Наявність тріщин або дефектів металу в зоні ріжучої кромки категорично не допускається.

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

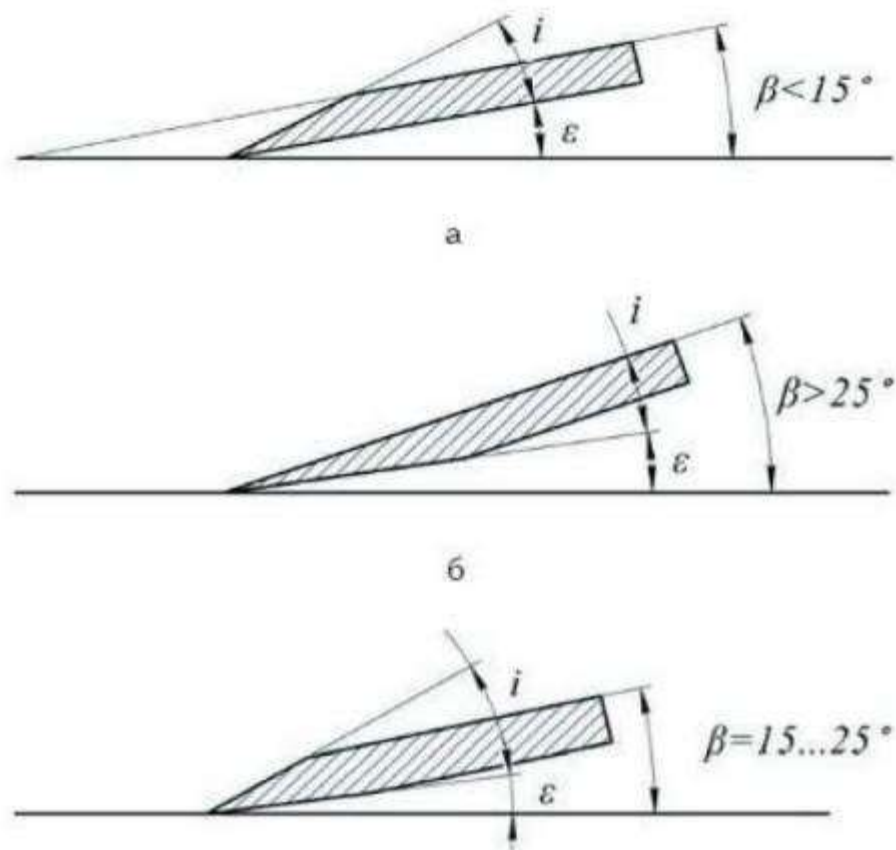


Рис. 2.2. Заточування культиваторних лап:

а - верхнє; б – нижнє; в - комбіноване

Стандарт не встановлює конкретного хімічного складу зносостійкого наплавленого шару, проте визначає нормативні показники напрацювання для стрілочастих лап — не менше 1200 км (приблизно 30 га) на одну одиницю. Виробник, у свою чергу, зобов'язаний гарантувати мінімальну довговічність не нижче 600 км (15 га) для лап із шириною захвату 270 і 330 мм.

Експлуатаційні умови роботи культиваторів характеризуються високим рівнем навантаження на робочі органи, що спричинює значний питомий тиск у зоні тертя — на рівні 0,6–0,8 МПа [16]. Внаслідок тривалої дії абразивного ґрунтового середовища спостерігається поступова зміна геометрії робочих елементів лапи, зокрема деформація та зменшення гостроти ріжучих кромek (рис. 2.3).

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Найінтенсивніше зношування фіксується в носиковій частині лапи, де відбувається заокруглення її профілю. Збільшення радіуса заокруглення носка є прямим наслідком концентрації максимальних контактних тисків у цій зоні, що з часом призводить до підвищення тягового опору робочого органа та, відповідно, до зростання енерговитрат агрегату [9].

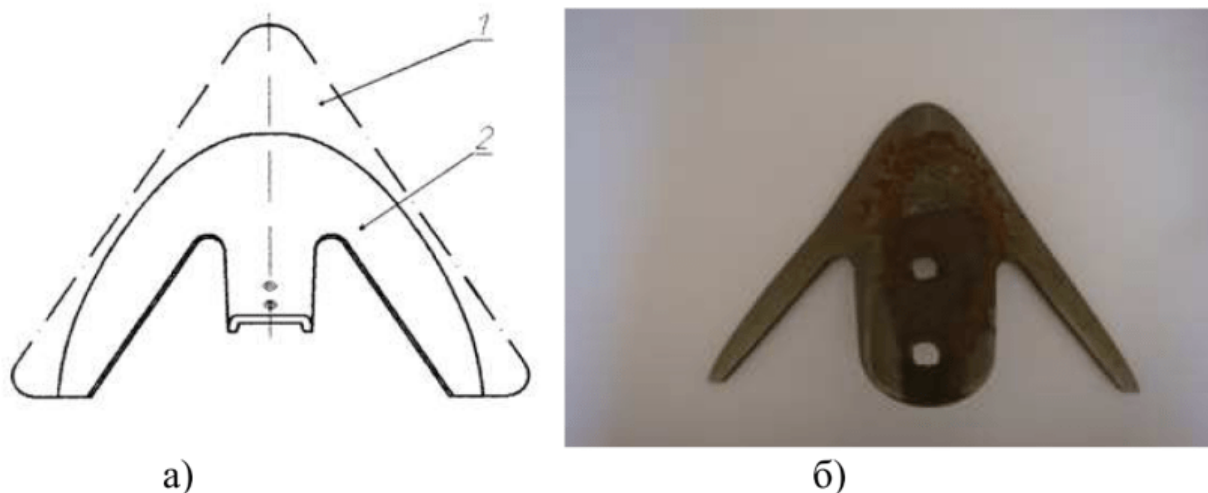


Рис. 2.3. Епюра зносу і зміни профілю (а) та загальний вид зношеної лапи (б):
1 - профіль нової лапи; 2 - профіль зношеної лапи

У процесі експлуатації робочі органи культиваторів поступово досягають граничного технічного стану, який визначається зміною основних геометричних параметрів. Зокрема, спостерігається збільшення кута загострення, товщини ріжучої крайки, а також формування широкої потиличної фаски, що спричинює неповне підрізання бур'янів, порушення стабільності глибини обробітку та зростання тягового опору агрегату [9, 15].

Згідно з результатами досліджень [17], для чорноземів центральної степової зони при швидкості руху культиватора до 2,7 м/с гранична товщина різальної крайки не повинна перевищувати 0,8 мм, а за більших швидкостей допускається її збільшення до 0,8–1,0 мм. У випадках, коли обробіток ґрунту здійснюється переважно з метою підтримання верхнього шару у розпушеному стані при незначній кількості бур'янів, допустима товщина ріжучої кромки може досягати 1,4 мм.

Полюві випробування показали, що ресурс роботи стрілочастих лап культиваторів до моменту вибракування становить у середньому 15–30 га на одну деталь, залежно від умов експлуатації. При цьому граничний лінійний знос леза до повторного заточування зазвичай знаходиться в межах 2–5 мм [17].

До основних критеріїв вибракування лап відносять також зменшення ширини крил у середній частині до 36–38 мм. Подальше зменшення цього розміру спричинює різке зниження міцності і пластичну деформацію елемента, що є неприпустимим для подальшої експлуатації. За досягнення зносу носкової частини до 30 мм спостерігається інтенсивне стирання стійки та кріпильних вузлів. Інші причини відмов, такі як зменшення ширини захвату, знос хвостовика або поломки, трапляються значно рідше і не мають такого визначального впливу на працездатність.

Інтенсивність стирання робочих поверхонь культиваторних лап визначається режимом роботи, абразивністю ґрунту, властивостями матеріалу леза та низкою трибологічних факторів, що впливають на динаміку процесу [6, 8]. Зміна геометрії робочих елементів у процесі експлуатації, як правило, негативно позначається на функціонуванні агрегату, знижуючи ефективність обробітку ґрунту та якість виконання агротехнічних операцій.

Рівень працездатності лап визначається міцнісними, агротехнічними та техніко-економічними показниками, на основі яких встановлюють гранично допустимі значення зносу. Інтенсивність зношування робочих поверхонь змінюється пропорційно до варіацій питомого тиску і умов тертя в зоні контакту.

Разом з тим, результати досліджень свідчать, що розподіл тиску ґрунту по робочих ділянках є складним і залежить від типу ґрунту. Зокрема, тиск на носкову частину лапи може змінюватися в межах 0,016–0,132 кг/см², на середню частину — 0,014–0,122 кг/см², а на п'яту — 0,017–0,130 кг/см².

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Поступове затуплення ріжучих крайок у процесі роботи призводить до збільшення тягового опору агрегату. За результатами експериментів, встановлено, що зростання товщини леза при його зношуванні викликає пропорційне збільшення питомого тягового опору, незалежно від швидкісного режиму культиватора (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Питомий тяговий опір культиваторних лап R [кН/м²]

Швидкість руху, км/год	Товщина леза лапи, мм		
	0,25	0,6	1,0
6,5	1,6	1,8	2,1
8,0	2,1	2,4	2,7
10,0	3,2	3,5	3,9

Результати аналізу конструкцій лап культиваторів, характеру їх зношування та закономірностей зміни форми під час експлуатації свідчать про доцільність проведення пошукових досліджень, спрямованих на визначення раціональних конструктивних параметрів, що забезпечують підвищення ресурсу роботи при збереженні функціональної ефективності. Оптимізація таких параметрів дозволить не лише продовжити строк служби робочих органів, але й зменшити енерговитрати при виконанні технологічних операцій.

2.2. Ґрунт як чинник абразивного зношування культиваторних лап

Інтенсивність зношування робочих органів культиваторів значною мірою визначається абразивною здатністю ґрунту. У трибосистемі «робочий орган культиватора – ґрунт» останній розглядається як поліфазне середовище, яке складається з твердої, рідкої та газової фаз. Основу твердої фази становлять мінеральні частки, гумус та органічні включення, що разом формують фізичні й фізико-механічні властивості ґрунтів [17, 20, 28, 29, 39].

Для оцінки механічного складу ґрунтів у дослідженнях взаємодії ґрунтообробних знарядь із робочим середовищем застосовують класифікацію . Вона ґрунтується на процентному співвідношенні «фізичної глини» (частки з діаметром $d < 0,01$ мм) і «фізичного піску» ($d > 0,01$ мм), а також передбачає розподіл ґрунтів за ступенем кам'янистості. Додатково виділяють фракції: кам'янисту (3–1 мм), піщану (1–0,05 мм), крупнопилову (0,050–0,01 мм), пилову (0,01–0,001 мм) та мулову ($d < 0,001$ мм).

Абразивна активність ґрунту проявляється у процесі тертя робочих поверхонь машинних елементів. Її рівень залежить переважно від гранулометричного складу та вологості ґрунту [16]. Висока абразивність піщаних ґрунтів зумовлена наявністю у їх складі кварцу з твердістю 900–1100 кг/мм² (9000–11000 МПа) та інших твердих мінералів. Вологість суттєво впливає на інтенсивність зношування: зі зменшенням вологості підвищується абразивність глинистих і суглинкових ґрунтів, тоді як для піщаних ґрунтів надмірна сухість зменшує зношувальний ефект через перекочування часток замість ковзання по поверхні робочого органу.

Вологість є однією з ключових фізичних характеристик ґрунту, що визначає його придатність до механічного обробітку. За умов оптимальної вологості (фізичної стиглості) забезпечуються найкращі показники розпушення, мінімальні енерговитрати та найменші втрати металу через абразивне зношування. При підвищеній вологості відбувається налипання часток ґрунту на робочі органи, забивання конструктивних елементів рослинними рештками, зростання тягового опору та порушення агротехнічних вимог. Характер і спосіб обробітку залежать від механічного складу ґрунту.

Як еталонний абразив у дослідженнях зношувальної здатності ґрунтів часто використовується чистий кварцовий пісок із розміром часток 0,25–0,30 мм і вологістю $W = 0–2\%$. Аналогічно застосовано кварцовий абразив із частками 0,16–0,32 мкм при відносній вологості 1%.

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Аналіз наукових джерел свідчить, що зношувальна здатність ґрунтів змінюється у широких межах, при цьому відсутній універсальний математичний опис цього процесу. Ускладнення дослідження зумовлюється тим, що інтенсивність зношування залежить не лише від абразивності, а й від питомого тиску між поверхнями тертя. Хоча більшість мінеральних часток мають округлу форму, серед них трапляються елементи з гострими ребрами, здатні спричиняти мікрорізання та відколювання поверхонь робочих органів [17].

Фрикційні властивості ґрунту виявляються при його ковзанні відносно сталевих поверхонь або під час взаємного переміщення часток (внутрішнє тертя). Сила тертя при цьому виступає як опір переміщенню та напрямлена протилежно до швидкості відносного руху. Дослідження, присвячені визначенню коефіцієнта тертя ґрунту по сталі, демонструють його залежність від механічного складу (рис. 2.4): для глинистих ґрунтів цей показник майже удвічі перевищує значення, характерне для піщаних середовищ.

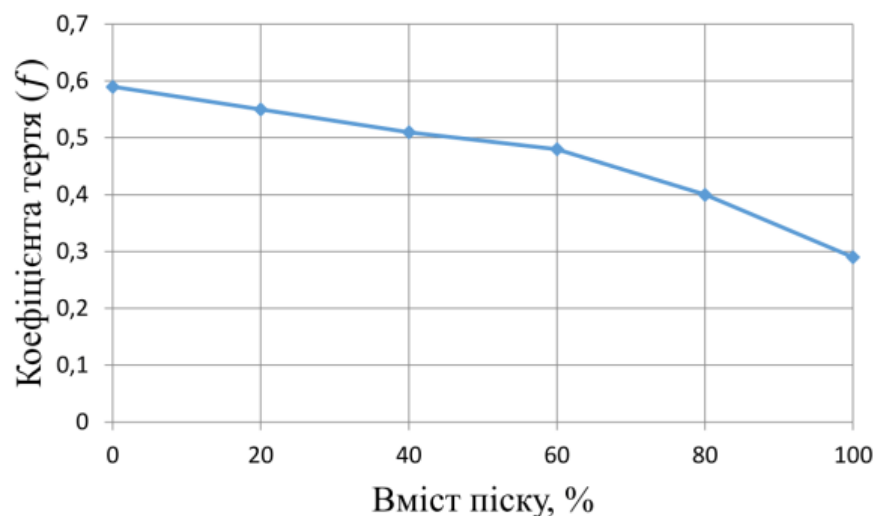


Рис. 2.4. Залежність коефіцієнта тертя (f) ґрунту по сталі від вмісту піску [17]

Вологість ґрунту виявляє суттєвий вплив на коефіцієнт тертя ґрунту по сталі. Дослідження показали, що при нормальному тиску на поверхню

ковзання до 0,1 МПа підвищення вологості призводить до зростання коефіцієнта тертя до певного максимуму. Подальше збільшення вологості, навпаки, спричинює його зниження (рис. 2.5).

Крім того, встановлено [17], що при конкретних значеннях тиску та вологості ґрунту коефіцієнт тертя «ґрунт – сталь» може зрівнюватися або навіть дещо перевищувати коефіцієнт тертя «ґрунт – ґрунт», що підкреслює значну роль вологості у взаємодії робочих органів культиваторів із ґрунтовим середовищем.

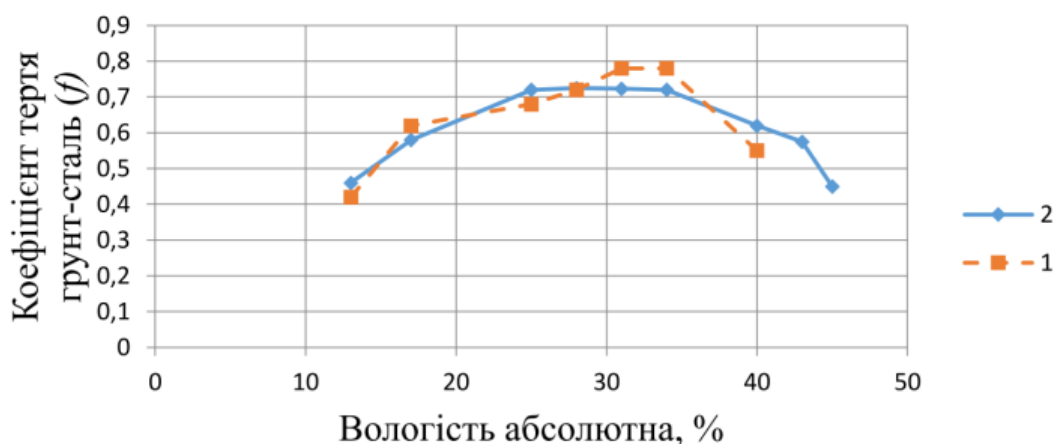


Рис. 2.5. Залежність коефіцієнта тертя ґрунт-сталь від вологості ґрунту (при нормальному навантаженні на ґрунт 0,28 МПа):

1 - експериментальне значення; 2 - розрахунковий коефіцієнт тертя [17]

Між твердістю ґрунту та його вологістю існує сильний обернений кореляційний зв'язок з коефіцієнтом кореляції 0,9–1,0. Зміна цих параметрів впливає на абразивні властивості ґрунту неоднозначно. З одного боку, підвищення твердості ґрунту спричинює зростання його зношувальної здатності через збільшення питомого тиску на контактні ділянки абразивних часток і поверхні робочого органу. З іншого боку, дослідження показують, що

при певних рівнях вологості інтенсивність зношування досягає максимального значення, після чого починає зменшуватися (рис. 2.6).

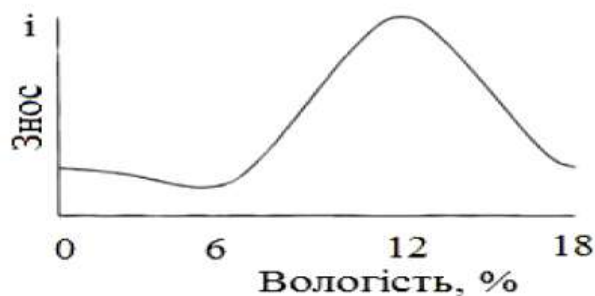


Рис. 2.6. Вплив вологості ґрунту на зношування робочих органів

Дослідження підтверджують, що при зміні вологості від 0 до 5–6 % спостерігається зниження твердості ґрунту та незначне зменшення інтенсивності зношування. Зі збільшенням вологості до 12 % інтенсивність зношування зростає в 3,5–4 рази, при цьому ступінь фіксації часток унаслідок ущільнення ґрунту підвищується на 30–40 % порівняно з ґрунтом вологості 5 %. Подальше збільшення вологості спричинює значне зменшення твердості та зносової здатності ґрунту, на поверхні робочих органів можуть з’являтися плями корозії.

Приблизні значення питомого опору ґрунтів різного механічного складу наведені нижче:

1. Легкі (піщані та супіщані) – 20–35 кПа;
2. Середні (легкі та середні суглинки) – 35–55 кПа;
3. Важкі (важкі суглинки) – 55–80 кПа;
4. Надто важкі (сильно дернові та глинисті) – 80–130 кПа.

Аналіз абразивних властивостей ґрунтового середовища підкреслює важливість врахування його початкових характеристик при проектуванні нових конструкцій робочих органів та дослідженні процесів взаємодії та зношування в трибосистемі «лапа культиватора – ґрунт».

2.3 Методи підвищення зносостійкості лап культиваторів

Дослідження [29, 30] показують, що для підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробної техніки застосовується широкий спектр методів. До основних підходів відносяться:

- використання нових матеріалів для виготовлення робочих органів;
- термічна та хіміко-термічна обробка металу;
- нанесення твердих сплавів на робочі поверхні;
- зміна геометрії поверхні лапи;
- виконання робочих органів зі змінними елементами;
- локальне зміцнення леза та ін.

Вибір матеріалу залежить від умов експлуатації: напруженого стану, тертя, температури та властивостей абразивного середовища [17, 28, 33]. Для цього використовують сталі високої твердості (карбідні сталі, леговані чавуни з хромом, марганцем, вольфрамом, нікелем) та спеціальні композиції для наплавлення. Одним із сучасних напрямів є застосування сталей з аустенітно-карбідною структурою, що здатні до мартенситного перетворення під час тертя, проте високі показники твердості обмежують використання таких матеріалів у динамічних умовах через підвищену крихкість [15].

Технічні вимоги для вітчизняних робочих органів передбачають застосування сталей 65Г, М76 або 45 з термообробкою до 39–44 HRC. Зарубіжні виробники використовують сталі підвищеної зносостійкості: Bellota – 28MnB5, Case – Earth Metal. Робочі органи піддають складній термо- та дробоструменевій обробці, що підвищує ресурс на 20–30 % [11].

Однак через сезонність експлуатації та економічні обмеження оптимальним є застосування методів локального зміцнення робочих поверхонь. До 90 % операцій у машинобудуванні здійснюють індукційним наплавленням [16], використовуючи сплави із низькою магнітною

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

проникністю та температурою плавлення на 150–200 °С нижче основного металу, наприклад, сормайт №1, ФБХ-6-2 та псевдосплави типу ПС [12].

Сучасні технології зміцнення на основі концентрованих потоків енергії дозволяють отримати робочі поверхні з високою твердістю, проте їх використання обмежене економічними чинниками. Об'ємна термообробка робочої поверхні забезпечує оптимальний баланс твердість–в'язкість для підвищення зносостійкості.

Крім того, структура сталі відіграє ключову роль: мартенситна структура показує максимальну стійкість до абразивного зношування [11, 26]. Ефективним є також локальне диференціальне зміцнення, наприклад, нанесення композиційного покриття з варіацією концентрації керамічного наповнювача вздовж ріжучої кромки леза [17]. Такий підхід дозволяє підвищити довговічність експериментальних лап у 1,45 рази при гарантованому напрацюванні до 32 га та зменшити тяговий опір після 30 га напрацювання на 20 %, забезпечуючи рівномірність зношування по довжині різальної кромки (рис. 2.7).

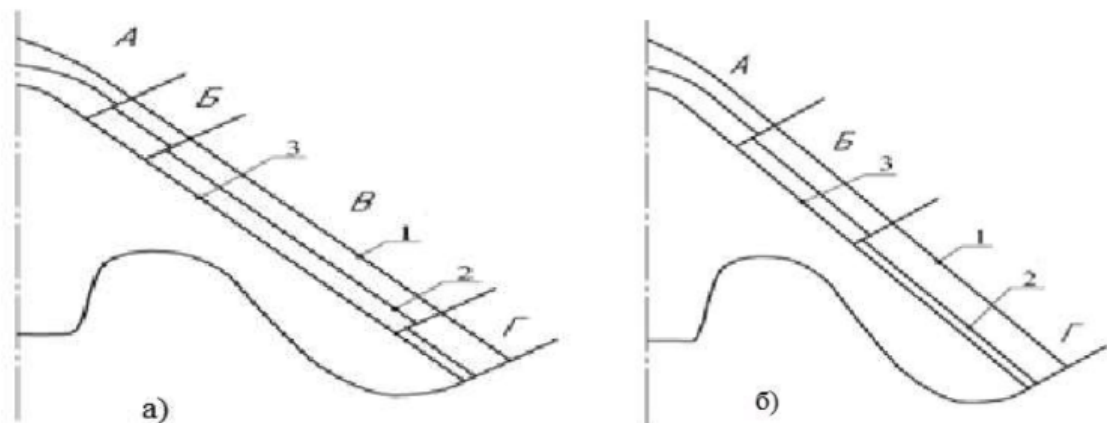


Рис. 2.7. Прогнози зміни форми зміцнених лез культиваторних лап при зношуванні:

а - чотири зони наплавлення сумішами А+Б+В+Г; б - три зони наплавлення сумішами А+Б+Г: 1 - контур наплавленої лапи; 2 - прогнозована лінія зносу; контур наплавленого шару); 3 - контур наплавленого шару

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Дослідження, проведені Солових Є.К. та Ауліним В.В. [13], продемонстрували високу ефективність використання лазерних технологій для впливу на характер зношування лез ґрунторіжучих елементів та збільшення їх експлуатаційного ресурсу. За результатами експериментів встановлено, що лазерна термообробка дозволяє зменшити інтенсивність зношування носових ділянок деталей у 1,3–1,4 раза порівняно з традиційною об'ємною термообробкою.

Одним із перспективних напрямів підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин є контроль над процесом їх зношування шляхом локального зміцнення лез по площині або вздовж довжини [14, 22]. У роботі [15] детально досліджено вплив точкового зміцнення на експлуатаційну надійність робочих органів. Суть цього методу полягає у наплавленні на основний метал зносостійкого матеріалу, наприклад порошкового дроту ПП-Нп-80Х20Р3Т. Утворені при цьому твердосплавні конусоподібні елементи – «точки» – мають змінний перетин і зменшувану твердість у напрямку до основного металу. Відношення твердості між основним і наплавленим металом становить 1:1,5...1:3,0. Розташування точок може бути локальним, спряженим або суміщеним залежно від функціонального призначення елемента. Під час експлуатації ділянки основного металу з меншими показниками зносостійкості піддаються більш інтенсивному стиранню, що формує западини та пилоподібне лезо. Така форма сприяє збільшенню ріжучої довжини та площі контакту з ґрунтом, створює більшу кількість концентраторів руйнування ґрунту (у прямолінійного леза їх лише два), що зменшує тиск ґрунту на лезо та знижує тяговий опір на 20 %. За експериментальними даними, робочі органи з точковим зміцненням демонструють підвищену довговічність у 1,5–2,0 раза (для розпушувальної лапи культиватора КРН-4,2 – у 2,7 раза) порівняно із серійними зразками.

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Розширення даного наукового напрямку здійснено О.В. Балабухою [14], який досліджував вплив дугового точкового наплавлення лемішів плугів на їх довговічність та формування зубчастого леза в умовах абразивного середовища. Встановлено, що зміцнення лемішів зі сталі Л53 методом дугового точкового наплавлення порошковим дротом ПП-АН170М з параметрами $D_{г} = 21-25$ мм та $S = 36$ мм підвищує їх ресурс у 4,8 раза. Досліджували також вплив кроку зміцнення Б (23, 28, 36 та 41 мм); при Б = 23 і 28 мм спостерігалися малі проміжки між точками, що ускладнювало формування зубчастого профілю, тоді як збільшення інтервалу між точками призводило до підвищення рельєфності леза.

Підвищення зносостійкості різальних елементів ґрунтообробних машин за допомогою лазерних технологій із реалізацією ефекту самозагострювання. Було отримано аналітичне вираження інтенсивності зношування вздовж довжини ріжучого елемента. Встановлено, що профіль леза та локальна зносостійкість залежать від властивостей середовища і матеріалу робочого елемента, напружено-деформованого стану та товщини зміцненого шару. Інтенсивність зношування змінюється за експоненціальним законом, а застосування лазерного зміцнення дозволяє керувати зношуванням у локальних ділянках, що дозволяє зменшити знос носка деталей на 1,3–1,4 раза порівняно з об'ємним загартуванням.

Математична модель автора дозволяє визначити оптимальні межі параметрів лап із локальним зміцненням: ширина захвату – 230, 270, 330 мм; радіус носка – 20–40 мм; кут розхилу крил – 70–73°; кут кришення – 27–30°; кут нанесення елементів – 20–30°; крок – 30–40 мм; довжина елементів – 40–50 мм; перекриття – 10–15 мм; ширина – 3–5 мм; товщина – 1–2 мм. Автором обґрунтовано підвищення ріжучої здатності стрілкової лапи шляхом керованого зношування леза з формуванням зубчастої поверхні, проте вплив такого конструктивного удосконалення на довговічність та енергоємність робочого органу потребує додаткового дослідження.

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Використання локального зміцнення леза культиваторних лап для підвищення зносостійкості та забезпечення ефекту самозагострювання розглянуто у [32]. Випробування проводились методом електродугового точкового наплавлення електродом Т-590 з присадковим матеріалом на лезо лапи при напрузі 38–42 В, струмі 190–220 А та часі наплавлення 3–4 с. В результаті формувались точки діаметром 20 ± 2 мм, товщиною 2,0–2,5 мм, а твердість робочих поверхонь становила 58–62 HRC.

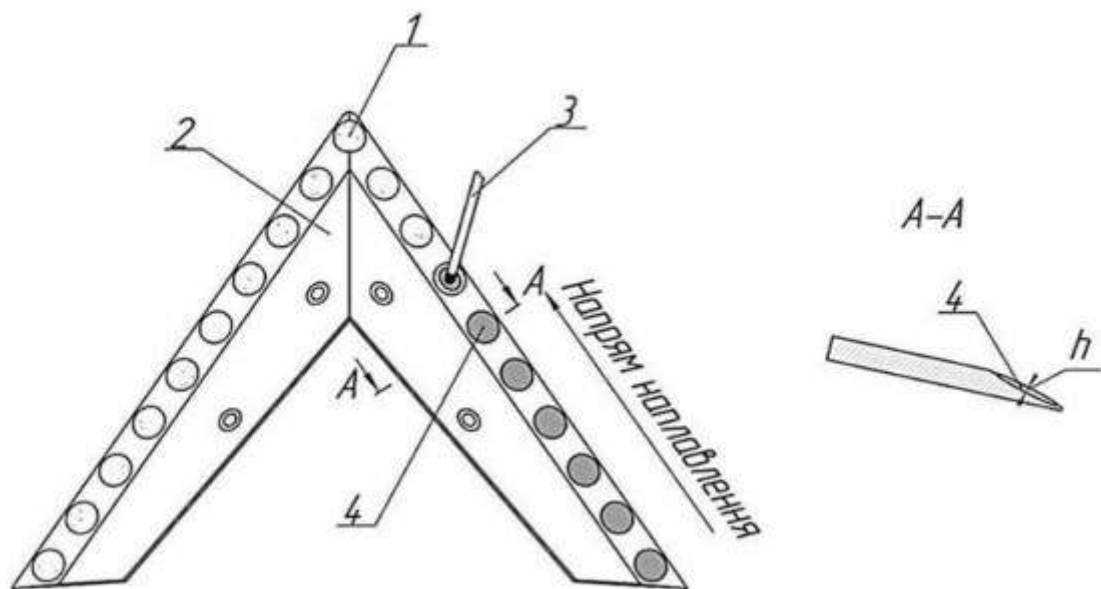


Рис. 2.8. Схема електродугового точкового нанесення покриття електродом Т-590 з додатковим присадковим матеріалом на леза культиваторної лапи: 1 - додатковий присадковий матеріал; 2 - культиваторна лапа; 3 - електрод Т-590; 4 - сформована зносостійка точка

Ресурс культиваторних лап, оброблених за розробленою технологією локального зміцнення, перевищує аналогічні показники серійних вітчизняних виробів у 2,1–2,3 раза. Водночас у наявних дослідженнях не наведено обґрунтування одного з ключових параметрів зміцнення — діаметра точок наплавлення, а також відсутні дані щодо відстані між ними вздовж робочого

леза. Це обмеження ускладнює точне прогнозування формоутворення поверхні лека в процесі його експлуатаційного зношування.

Аналіз методів підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробної техніки підкреслює необхідність проведення експериментально-теоретичних досліджень, спрямованих на визначення оптимальних параметрів локального зміцнення та геометрії лека культиваторних лап. Головною метою таких досліджень є уповільнення інтенсивності зношування та зменшення питомого тягового опору під час виконання технологічних операцій.

Одним із перспективних підходів до локального поверхневого зміцнення є застосування електромеханічної обробки (ЕМО) з тильного боку робочого лека (рис. 2.9). Використання високих струмів у поєднанні з пластичною деформацією дозволяє формувати на поверхні робочого органу шар із характерною «білою смугою», що досягає твердості 60 HRC, забезпечуючи підвищену зносостійкість лека та ефективність роботи культиватора.



Рис. 2.9. Зміцнення електромеханічною обробкою лап культиватора з тильного боку лека

Невелика глибина термозміцненого шару, що не перевищує 1,2 мм, у поєднанні з високими вимогами до застосовуваного інструменту та обладнання, суттєво знижує ефективність зазначеної технології.

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Одним із поширених методів підвищення зносостійкості робочих органів є наплавлення абразивостійкого шару на лезову частину [5], яке може виконуватися за кількома технологічними схемами (рис. 2.10).

Лезова частина, виконана у вигляді конусної пластини, виготовляється як окремий елемент із сталі ресорно-пружинного класу, після чого піддається термозміцненню до твердості 40–45 HRC по всій товщині. Далі лезо приєднується до робочої поверхні остова шляхом зварювання: з тильного боку накладається суцільний шов вздовж усієї довжини крил, а з боку робочої поверхні виконуються окремі ділянки швів довжиною приблизно 6–8 мм, не більше двох на кожне крило (рис. 2.11).

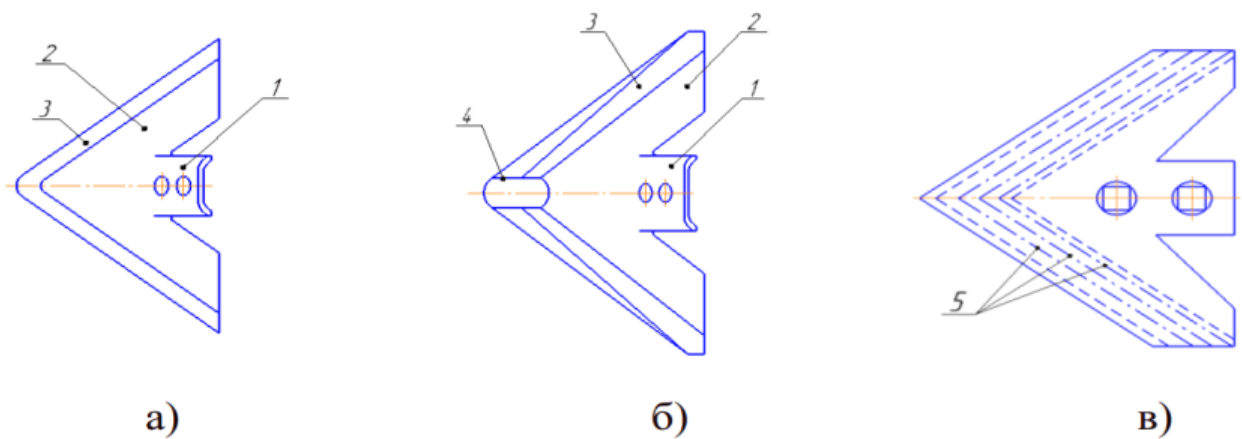


Рис. 2.10. Приклади наплавлення культиваторних лап:

- а - з наплавленим лезом, б - з наплавленням леза носка і зміненим кутом наплавлення; в – з армованою зносостійким сплавом поверхнею;
 1 - держатель; 2 - крила; 3 - наплавлений зносостійкий шар, 4 - зміцнена носова частина; 5 - лінії армування

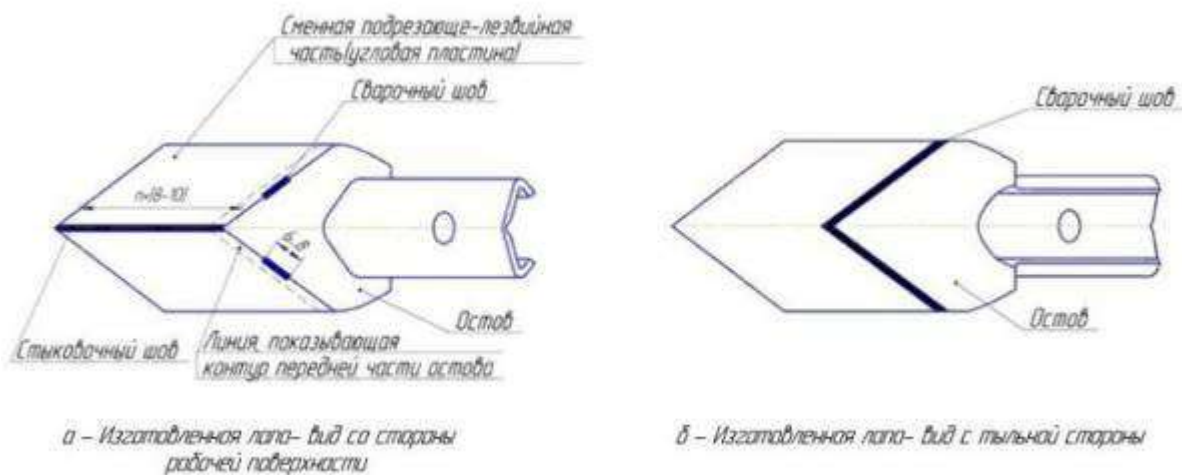


Рис. 2.11. Лапа, що складається з остова і приварених термозміцнених елементів

Запропонований метод відновлення лап культиваторів спрямований на підвищення їх довговічності шляхом збільшення зносостійкості. Основна суть методу полягає в кріпленні кутової пластини, зміцненої з тильного боку за допомогою електролізного борірування або електроіскрової обробки, до основної частини леза з дотриманням нормованих геометричних параметрів.

Зношування робочих органів має овальну форму та неоднакові розміри для окремих лап, що потребує індивідуального узгодження геометрії основи з замінами крилами. Це, у свою чергу, зумовлює необхідність додаткових технологічних операцій та спеціального оснащення. Метод передбачає нанесення двох шарів твердих сплавів електролізом на неповністю зношену ділянку лапи з використанням різьбових з'єднань (рис. 2.12, а).

До обмежень технології відносяться: сувора координація кріпильних отворів, нарізування різьблення з дрібним кроком, виконання електролізного або електроіскрового легування, а також складність забезпечення достатнього ресурсу через обмежену ширину і товщину зносостійкого шару. Крім того, виникають труднощі при формуванні надійного нарізного з'єднання на сильно зношених ділянках, що суттєво обмежує практичне застосування методу.

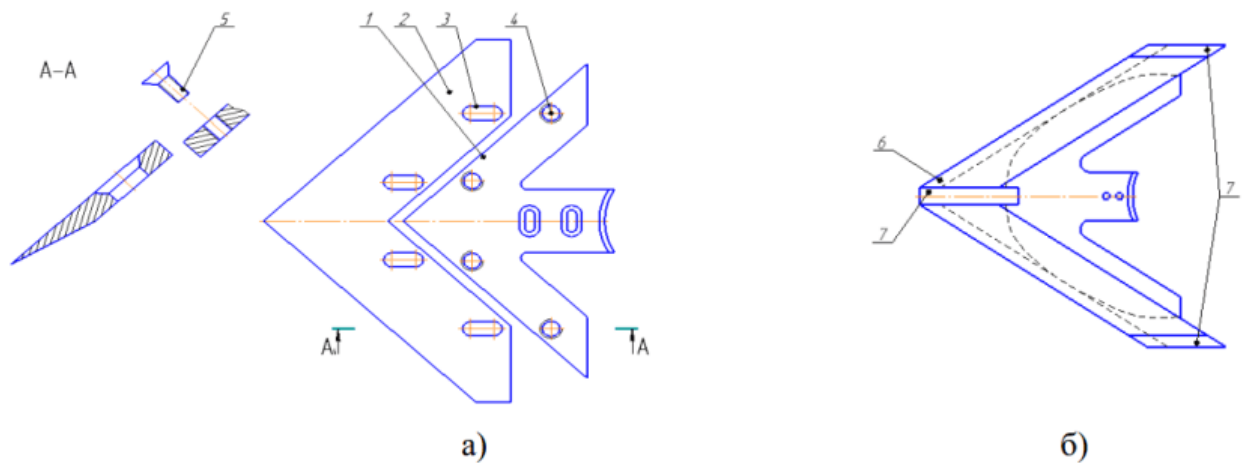


Рис. 2.12. Схема відновлення лап шляхом кріплення кутової пластини:
 1 - відновлювана лапа; 2 - кутові пластини; 3 - наскрізні отвори; 4 - різьбові отвори; 5 - гвинти; 6 - зміцнюючі покриття; 7 - вкладиші; 8 - вставка

Вдале використання методу наплавлення валиків обумовлює використання даної технології при зміцненні лап культиваторів, схеми розташування приведені на рис. 2.13 і форма валиків представлені на рис. 2.14.

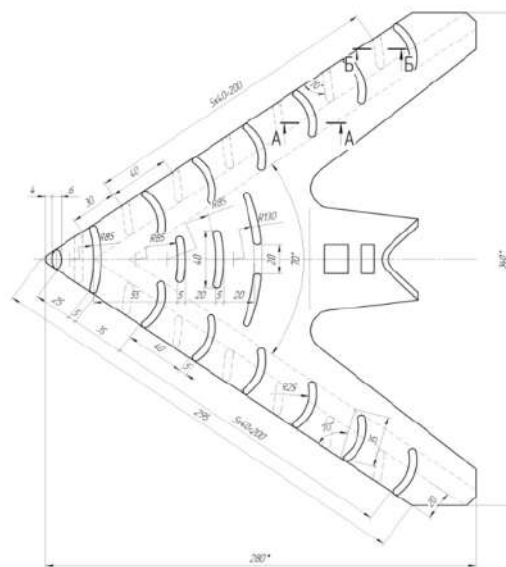


Рис. 2.13. Схеми розташування валиків при наплавленні лап культиваторів



Рис. 2.14. Форма валиків при наплавлені лап культиваторів

2.4. Взаємодія лапи з ґрунтом та її вплив на триботехнічні характеристики робочих поверхонь і тяговий опір

Характер процесів, що відбуваються в трибосистемі «робочий орган – ґрунт», визначається, з одного боку, властивостями та станом ґрунтового середовища, а з іншого – конструктивними характеристиками робочого органу, такими як форма, геометричні параметри леза та шорсткість робочих поверхонь.

Взаємодія робочих органів з ґрунтом є предметом численних досліджень [8, 9, 12, 16], метою яких є створення конструкцій, здатних забезпечувати оптимальне зміння стану ґрунту та його фізико-механічних властивостей при мінімальних енергетичних витратах, зокрема тяговому опорі.

Енергетичні витрати на обробіток ґрунту значною мірою залежать від типу деформацій, що відбуваються в ґрунті, які, у свою чергу, визначаються його фізико-механічними властивостями, геометричними та технологічними

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

параметрами робочих органів, їх кінематикою, розташуванням та способом зміцнення [15, 17]. Оскільки ґрунтообробні робочі органи часто є модифікаціями дво- або тригранних клинів, вони створюють у ґрунті різноманітні деформації – розтягу, стиснення, зсуву, вигину та кручення, що формує складний напружено-деформований стан ґрунту.

Дослідження [39] показують, що ефективно руйнування ґрунту робочим органом доцільно здійснювати за рахунок деформацій розтягу, зсуву та згину, що покладено в основу оптимізаційних критеріїв цього процесу. Проте більшість ґрунтообробних робочих органів реалізують переважно деформацію стиснення, яка є більш енергоємною – у 10–20 разів порівняно з деформацією розтягування. Зміна співвідношення цих видів деформацій досягається корекцією форми та геометричних параметрів робочих органів.

Для оцінки опору руйнування ґрунту застосовують теорію міцності Кулона–Мора, що базується на моделі суцільного ізотропного середовища. Хоч ця модель є ідеалізацією, вона широко використовується в механіці ґрунтів і дозволяє спрощено описати закони деформації ґрунту, переходячи від локальних напруг і деформацій нескінченно малих об'ємів до напружено-деформованого стану всього шару ґрунту.

Ряд досліджень показав, що геометрія, параметри та режими роботи ґрунтообробних робочих органів визначають як якість обробітку ґрунту, так і енергоємність процесу.

За даними геометрія робочого органу впливає на розподіл тиску на межі «робочий орган–ґрунт», що визначає поля напружень і деформації. Цей розподіл безпосередньо впливає на характер зношування та зміну початкових розмірних характеристик робочих органів. Аналіз показав, що кривизна профілю леза пов'язана з міцністю ґрунту на розтяг і стиск, а також довів теоретичну можливість приведення ґрунту в оптимальний за щільністю стан

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

шляхом створення мінімальних нормальних напруг робочим органом, що зменшує інтенсивність зношування.

Проектування форми робочих органів із урахуванням агротехнічних вимог було розглянуто, що дозволяє отримувати конструкції нових принципових форм. Реальний ґрунт є дисперсною системою з численними твердими частинками та агрегатами, взаємопов'язаними міжагрегатними зв'язками різної природи. Під час взаємодії з робочими органами необхідно враховувати деформацію як твердих часток, так і водоповітряних фаз, що заповнюють пори й капіляри. Локальні концентрації напруг у місцях мікротріщин і порожнин дозволяють знизити витрати енергії на руйнування ґрунту та зменшити інтенсивність зношування робочих поверхонь.

Відомо], що взаємодія робочих органів з ґрунтом змінює його початкову структуру, щільність і фізико-механічні властивості, що впливає на характер зношування. Аналіз численних робіт показує, що зменшення триботехнічних та енергетичних витрат досягається через: застосування деформацій розтягу ґрунту, комбінування напружень різного знаку, локалізацію напружень на лезі, вибір оптимальних параметрів локального зміцнення та реалізацію умов самозагострювання.

Дослідження встановили, що зменшення енерговитрат можливе при використанні робочих органів із змінною кривизною поверхні: нижня частина – увігнута, верхня – опукла. При цьому ґрунт зазнає змінну деформацію: спочатку на стиск, а потім на розтяг, що досягається шляхом зміни профілю леза [40, 44].

Узагальнення експериментальних даних показує, що найсуттєвіший вплив на енергоємність і ступінь кришення ґрунту має кут постановки робочої поверхні до дна борозни. Оптимізація цього параметру дозволяє зменшити енерговитрати на виконання процесу, проте ефект у попередніх дослідженнях зазвичай не перевищував 5–20% .

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Таким чином, оптимізація взаємодії робочого органу з ґрунтом та формування триботехнічних характеристик робочих поверхонь потребує подальших теоретичних та експериментальних досліджень. Перспективними напрямками є: пошук оптимального профілю леза культиваторної лапи, мінімізація швидкості зношування та тягового опору, обґрунтування параметрів локального зміцнення, формування зубчастої поверхні леза та корекція силової взаємодії в трибосистемі «лапа культиватора – ґрунт».

На основі проведеного аналізу можна виділити наступні наукові задачі:

1. Теоретично обґрунтувати раціональний профіль лапи, що забезпечує мінімальну швидкість зношування та тяговий опір.
2. Визначити оптимальне розташування елементів локального зміцнення на лезі лапи.
3. Експериментально оцінити вплив форми та параметрів зміцнення на зносостійкість лап культиваторів.
4. Провести порівняльні лабораторні та експлуатаційні випробування серійних та розроблених робочих органів.
5. Здійснити техніко-економічну оцінку ефективності впровадження запропонованих конструкцій у виробництво.

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЛАП КУЛЬТИВАТОРІВ ШЛЯХОМ ЛОКАЛЬНОГО ЗМІЦНЕННЯ ЛЕЗА

3.1. Математичні моделі зношування поверхні леза лапи культиватора з періодичними ділянками локального зміцнення

Схема поверхні локально зміцненого леза лапи культиватора на рис. 3.1.

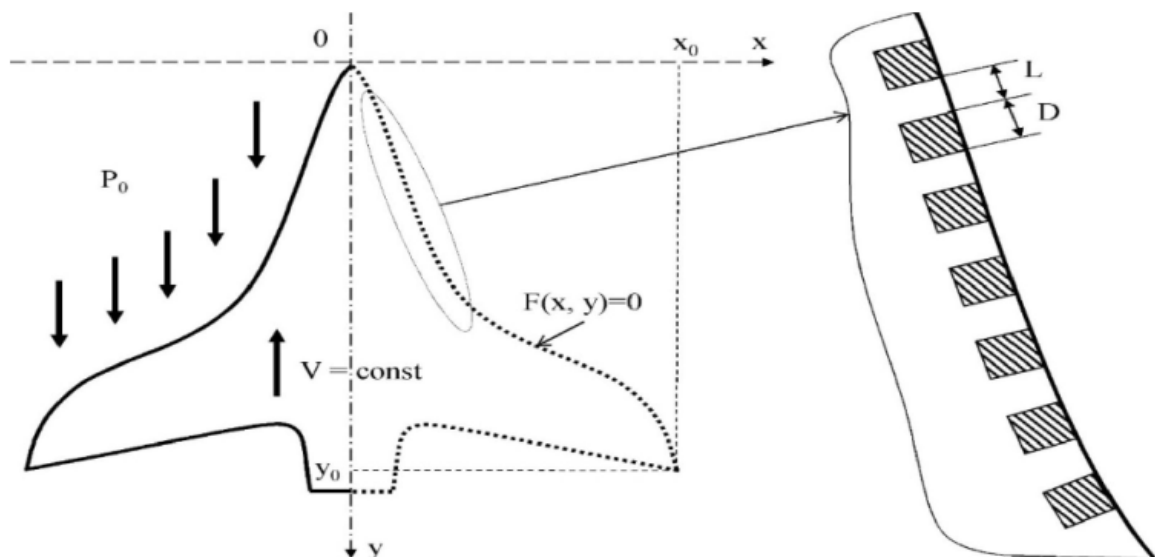


Рис. 3.1. Схема поверхні локально зміцненого леза лапи культиватора

При розробці математичних моделей поверхні леза лапи культиватора з періодичними ділянками локального зміцнення приймаються такі основні припущення:

1. Ґрунт розглядається як суцільне, однорідне, однофазне та ізотропне середовище.
2. Для опису міцності ґрунту використовується теорія Кулона-Мора.
3. Взаємодія леза лапи з ґрунтом моделюється як плоска задача теорії пружності у прямокутних координатах.
4. Розглядається вплив швидкостей поширення напружень і деформацій у ґрунті під час контакту.

5. Коефіцієнт зчеплення k та кут внутрішнього тертя φ ґрунту враховують його вологість W_0 та щільність, визначаючись за емпіричними залежностями:

$$k = -2,25 \cdot 10^{-4} W_0^3 + 1,37 \cdot 10^{-2} W_0^2 - 1,99 \cdot 10^{-2} W_0, \quad (3.1)$$

$$\varphi = -4,13 \cdot 10^{-4} W_0^2 + 1,66 \cdot 10^{-2} W_0^2 + 4,51 \cdot 10^{-1}. \quad (3.2)$$

$$\zeta = -2,939 W_0^2 + 89,43 W_0^2 + 797, \quad (3.3)$$

де k – коефіцієнт зчеплення ґрунту, Па; φ – кут внутрішнього тертя ґрунту, рад; W_0 – вологість ґрунту; ζ – щільність ґрунту, кг/м³.

Додаткові припущення при моделюванні зношування леза лапи культиватора:

- неоднорідна структура композитного матеріалу леза розглядається як періодична;
- швидкість лінійного зношування леза пропорційна величині тиску ґрунту на робочу поверхню;
- реологічна поведінка матеріалу основи та ділянок локального зміцнення описується моделлю «тіла Максвела-Томсона».

У межах цих припущень швидкість лінійного зношування леза лапи v_z можна пов'язати з напруженнями за співвідношенням:

$$\frac{\partial I_u}{\partial t} = c \frac{\sigma_x}{H}; \quad \frac{\partial I_v}{\partial t} = c \frac{\sigma_y}{H}; \quad (3.4)$$

де I_u, I_v – переміщення межі леза при зношуванні (абсолютний лінійний знос) вздовж координатних осей Ox та Oy , відповідно, м; σ_x, σ_y – нормальні напруження вздовж осей Ox та Oy , Па; c – експериментально визначений параметр, м/с; H – твердість матеріалу, Па.

Враховуючи поставлену задачу, спрямовану на мінімізацію швидкості зношування робочої поверхні лапи культиватора, та використовуючи представлені залежності (3.4), можна сформулювати умову мінімальності напруженості на робочій поверхні леза як критерію оптимізації процесу зношування.

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

$$\frac{\partial I_u}{\partial t} \rightarrow \min \Rightarrow \sigma_x \rightarrow \min; \quad \frac{\partial I_v}{\partial t} \rightarrow \min \Rightarrow \sigma_y \rightarrow \min. \quad (3.5)$$

Рівняння рівноваги елементарного об'єму суцільного вагомого середовища ґрунту для розглядуваної плоскої задачі у прямокутній системі координат (x, y) та тотожність, яка задовольняє дане рівняння, мають вигляд:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = \Omega, & \sigma_x = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \Omega x, \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = 0, & \sigma_y = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \xi_0 \Omega x, \\ \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y}, \end{cases} \quad (3.6)$$

де τ_{xy} – дотичне напруження опору ґрунту, Па; $\Omega = \zeta \cdot g \cdot \tan \rho$ – об'ємна сила інерції ґрунту щодо лапи, Н/м³; g – прискорення вільного падіння; ρ – кут внутрішнього тертя ґрунту, рад; ξ_0 – коефіцієнт бокового тиску ґрунту.

Згідно з умовою міцності Мора, середня головна напруга не впливає на міцність ґрунту. Це положення може бути представлено у вигляді діаграми Мора, що дозволяє графічно оцінювати стан напружень ґрунту та визначати критичні значення для розрахунку опору деформації.

$$\frac{\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}}{\sigma_x + \sigma_y + 2k \operatorname{ctg} \rho} = \sin \rho. \quad (3.7)$$

Граничними умовами для поставленої задачі є:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_x(0,0) = 0, \\ \sigma_x(x_0, x_0) = 0, \\ \tau_{xy}(0,0) = 0, \\ \sigma_x(x,y) \rightarrow \min \Rightarrow \frac{\partial \sigma_x(x,y)}{\partial x} = 0, \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \sigma_y(0,0) = P_0 = \frac{1}{2} \zeta V^2 \\ \sigma_y(x_0, y_0) = P_0 = \frac{1}{2} \zeta V^2 \\ \tau_{xy}(x_0, y_0) = 0, \\ \sigma_y(x,y) \rightarrow \min \Rightarrow \frac{\partial \sigma_y(x,y)}{\partial y} = 0. \end{array} \right. \quad (3.8)$$

Вирішуючи спільно рівняння (3.6) - (3.8) отримуємо:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \kappa \lambda_1^2 C e^{\frac{\Omega}{\kappa}(\lambda_1 y + \lambda_2 x)} + \kappa a_{02} + \Omega \left(\frac{b_1 a_{03} - b_2^2 a_{30} + b_1 b_2 - b_2^2 \xi_0}{(1 + b_1 b_2)} + 1 \right) x + \Omega a_{03} y, \\ \sigma_y &= \kappa \lambda_2^2 C e^{\frac{\Omega}{\kappa}(\lambda_1 y + \lambda_2 x)} + \kappa a_{20} + \Omega (a_{30} + \xi_0) x + \\ &+ \Omega \left[\frac{b_1 (b_1 a_{03} + b_1 b_2 - b_2^2 \xi_0) - a_{30} (1 + 2b_1 b_2) b_2}{1 + 2b_1 b_2} + b_1 - b_2 \xi_0 \right] y, \\ \tau_{xy} &= -\kappa \lambda_1 \lambda_2 C e^{\frac{\Omega}{\kappa}(\lambda_1 y + \lambda_2 x)} - \kappa b_1 a_{02} + \kappa b_2 a_{20} + \kappa \frac{\cos p}{\chi_1 \beta} - \\ &- \Omega \left[\frac{b_1 (b_1 a_{03} + b_1 b_2 - b_2^2 \xi_0) - a_{30} (1 + 2b_1 b_2) b_2}{1 + 2b_1 b_2} + b_1 - b_2 \xi_0 \right] x + \\ &- \Omega \frac{b_1 a_{03} - b_2^2 a_{30} + b_1 b_2 - b_2^2 \xi_0}{(1 + b_1 b_2)} y, \end{aligned} \quad (3.9)$$

де $b_1 = (x_1 \alpha - \sin p) / (2x_1 \beta)$; $b_2 = (x_1 \alpha - \sin p) / (2x_1 \beta)$; α, β – чисельні коефіцієнти апроксимації $\alpha = 0,3978$, $\beta = 0,9604$;

$x_1 = \text{sign}(\bar{\sigma}_x - \bar{\sigma}_y)$ – кусочно-постійна функція;

$a_{12} = (1 + b_1 b_2)^{-1} (b_1 a_{03} - b_2^2 a_{30} + b_1 b_2 - b_2^2 \xi_0)$;

$a_{21} = b_1 a_{12} - b_2 a_{30} + b_1 - b_2 \xi_0$; $a_{11} = b_1 a_{02} - b_2 a_{20}$.

Закон Гука для плоскої задачі теорії пружності в прямокутній системі координат (x, y) можна записати у вигляді:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x - \nu \sigma_y}{E}, \quad \varepsilon_y = \frac{\sigma_y - \nu \sigma_x}{E}, \quad (3.10)$$

де $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ – відносні подовження уздовж осей O_x та O_y відповідно; E – модуль пружності ґрунту (модуль Юнга); σ_x, σ_y – нормальні напруження вздовж відповідних осей; ν – коефіцієнт Пуассона ґрунту.

Припускаючи, що деформації вздовж осей O_x та O_y є ізотропними та рівномірними, отримуємо умову:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y. \quad (3.11)$$

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

Підставляючи залежності (3.10) у вираз (3.11) та використовуючи попередньо отримані співвідношення (3.9), формується математична модель, яка дозволяє визначити раціональний профіль леза лапи культиватора, оптимальний з точки зору мінімізації зношування та зниження тягового опору.

$$\begin{aligned} \kappa\lambda_1^2 C e^{\frac{\Omega}{\kappa}(\lambda_1 y + \lambda_2 x)} + \kappa a_{02} + \Omega \left(\frac{b_1 a_{03} - b_2^2 a_{30} + b_1 b_2 - b_2^2 \xi_0}{(1 + b_1 b_2)} + 1 \right) x + \Omega a_{03} y = \\ = \kappa\lambda_2^2 C e^{\frac{\Omega}{\kappa}(\lambda_1 y + \lambda_2 x)} + \kappa a_{20} + \Omega(a_{30} + \xi_0) x + \\ + \Omega \left[\frac{b_1(b_1 a_{03} + b_1 b_2 - b_2^2 \xi_0) - a_{30}(1 + 2b_1 b_2)b_2}{1 + 2b_1 b_2} + b_1 - b_2 \xi_0 \right] y. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Підставляючи в (3.12) отримані константи, значення постійних ($V = 1,5$ м/с, $W_0 = 22$ %, $\zeta = 1340$ кг/м³, $\rho = 0,6274$ рад; $\kappa = 2,10169$ Па; $g = 9,8$ м/с², $\alpha = 0,3978$, $\beta = 0,9604$, $\xi_0 = 0,3$ МПа, $x_0 = 0,165$ м, $y_0 = -0,23$ м, $C = 3,14636 \cdot 10^7$, $a_{02} = -1872,98$, $a_{20} = 701,613$, $a_{03} = 1744,68$, $a_{30} = -292982$, $\lambda_1 = -0,00771547$) і, вирішуючи його в програмному пакеті «Mathematica», отримано геометричну форму поверхні лапи культиватора у вигляді неявної функції (рис. 3.2):

$$0,0000620839x + 0,36307y - 0,0000447661 e^{-3,28983 x - 35,0009 y} = 0. \quad (3.13)$$

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

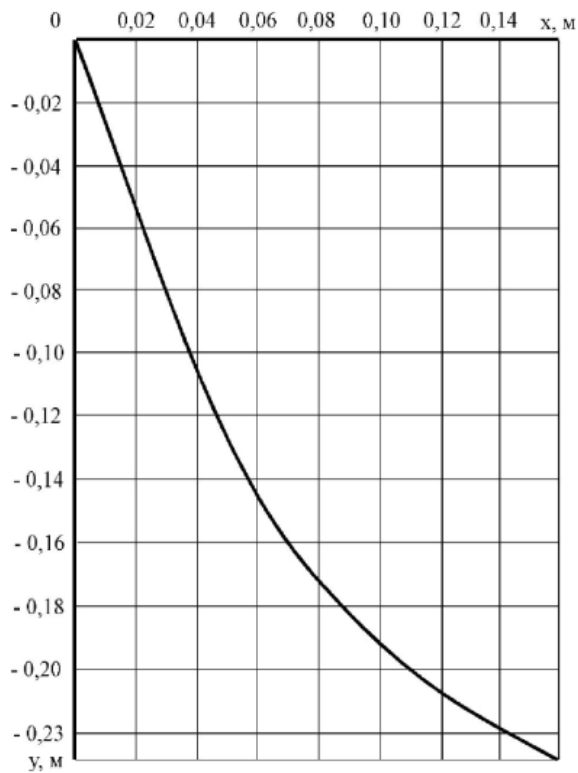


Рис. 3.2. Геометрична форма поверхні лапи культиватора

Кут розхилу лапи культиватора визначається з умови (рис. 3.3):

$$\gamma = 90 + 180 \cdot \arctg\left(\left.\frac{dy(x)}{dx}\right|_{x=0}\right) \cdot \quad (3.14)$$

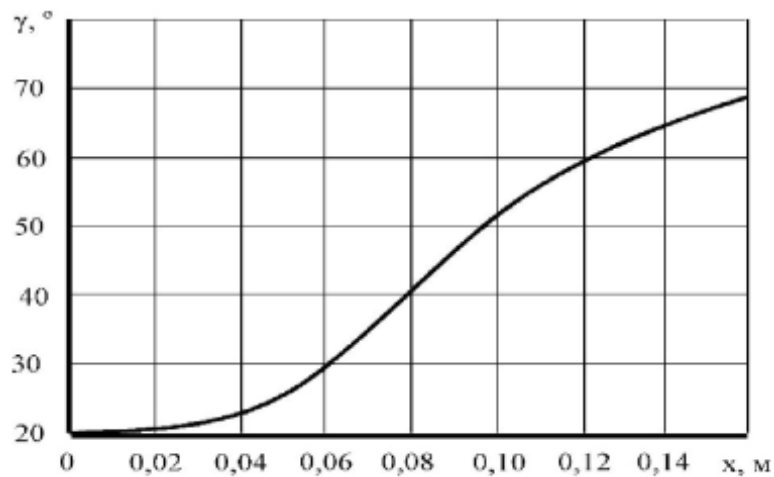


Рис. 3.3. Зміна кута розхилу по довжині леза лапи культиватора

Відповідно до залежності (3.4) та розподілу нормального напруження σ_y , визначеного за виразом (3.9), швидкість зношування $\frac{l}{t}$ робочої поверхні леза лапи культиватора прямо залежить від кута розхилу лапи (рис. 3.4). При кутах розхилу в діапазоні від 25° до 45° швидкість зношування змінюється приблизно за лінійним законом, що дозволяє коригувати геометричні параметри леза для оптимізації його зносостійкості.

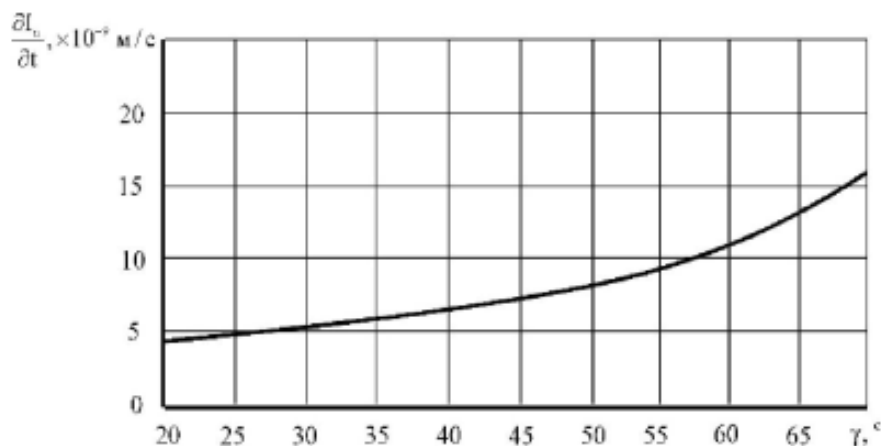


Рис. 3.4. Залежність швидкості зношування від кута розхилу лапи культиватора

За допомогою програмного пакета «**Mathematica**» проведено варіювання параметрів ґрунту — вологості W , щільності ζ , коефіцієнта бокового тиску та швидкості руху лапи культиватора V — що дозволило визначити відповідні оптимальні геометричні форми поверхні леза. Зі збільшенням швидкості переміщення в межах від 0,5 м/с до 2,5 м/с спостерігається збільшення кута розхилу γ :

$$\gamma_{V=0,5} = 17,2^\circ; \gamma_{V=1,5} = 19,9^\circ; \gamma_{V=2,5} = 22,1^\circ.$$

При цьому форма леза наближається до лінійного закону, особливо при швидкості $V = 2,5$ м/с.

Зміна вологості ґрунту в межах 18–24 % впливає на кут розхилу лапи культиватора таким чином:

$$\gamma_{W=18\%} = 15,4^\circ; \gamma_{W=22\%} = 19,9^\circ; \gamma_{W=24\%} = 22,6^\circ.$$

При максимальній вологості $W = 24\%$ кут загострення досягає 22° , що обумовлено параболічним впливом вологості на коефіцієнт зчеплення k , кут внутрішнього тертя та щільність ζ ґрунту.

Зі збільшенням коефіцієнта бокового тиску ґрунту ξ_0 у межах $0,1-0,5$ МПа спостерігається зростання кута розхилу:

$$\gamma_{\xi=0,1} = 18,8^\circ; \gamma_{\xi=0,3} = 19,9^\circ; \gamma_{\xi=0,5} = 20,4^\circ.$$

Варіювання щільності ґрунту ζ у діапазоні $1100-1500$ кг/м³ показало, що при збільшенні щільності кут розхилу зменшується:

$$\gamma_{\zeta=1260} = 21,0^\circ; \gamma_{\zeta=1340} = 19,9^\circ; \gamma_{\zeta=1420} = 18,7^\circ.$$

Для аналізу зношування локально зміцненого леза враховано, що лезо взаємодіє з ґрунтом під тиском

$$P_0 = \frac{1}{2} \zeta V^2$$

і рухається вздовж осі O_y з постійною швидкістю V . Локально зміцнене лезо характеризується змінною твердістю поверхні $H(x, y)$, що описується періодичною функцією $F(x, y) = 0$ з періодом $T = L + D$.

Твердість поверхні леза $H(x, y)$ приймається за законом:

$$H(X(x, y)) = \begin{cases} H_1, & X \in [n(L + D), n(L + D) + L], n \in \mathbb{Z} \\ H_2, & X \in [n(L + D) + L, (n + 1)(L + D)], n \in \mathbb{Z} \end{cases} \quad (3.15)$$

де $X = x_0 + x \cdot \cos \theta(x_0; y_0) - y \cdot \sin \theta(x_0; y_0); \theta(x_0; y_0) = 90^\circ + \frac{180^\circ}{\pi} \arctg \left[\frac{dy}{dx}(x_0; y_0) \right];$

H_1, H_2 – твердість базового матеріалу лапи культиватора і локального зміцнення, відповідно, ($H_2 = \eta H_1$).

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

Приймаючи реологічну модель матеріалу поверхні леза лапи культиватора у вигляді «тіла Максвелла-Томсона», отримано визначаюче співвідношення у випадку плоскої деформації:

$$\begin{cases} \varepsilon_x + T_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial t} = \frac{1-\nu_M^2}{E_M} \left(\sigma_x + T_\sigma \frac{\partial \sigma_x}{\partial t} \right) + \frac{\nu_M(1+\nu_M)}{E_M} \left(\sigma_y + T_\sigma \frac{\partial \sigma_y}{\partial t} \right), \\ \varepsilon_y + T_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial t} = \frac{1-\nu_M^2}{E_M} \left(\sigma_y + T_\sigma \frac{\partial \sigma_y}{\partial t} \right) + \frac{\nu_M(1+\nu_M)}{E_M} \left(\sigma_x + T_\sigma \frac{\partial \sigma_x}{\partial t} \right), \\ \Phi_{xy} + T_\varepsilon \frac{\partial \Phi_{xy}}{\partial t} = \frac{1+\nu_M}{E_M} \left(\tau_{xy} + T_\sigma \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial t} \right), \end{cases} \quad (3.16)$$

де $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ – відносне подовження по осям Ox, Oy , відповідно; Φ_{xy} – дотичне подовження; E_M – модуль пружності (модуль Юнга) матеріалу лапи; ν_M – коефіцієнт Пуассона матеріалу лапи; T_ε, T_σ – час релаксації.

Рішенням рівняння (3.16) і (3.4) є:

$$\begin{cases} I_u = \frac{c}{H} \sigma_x \left(1 - e^{-\frac{t}{T_\sigma}} \right), \\ I_v = \frac{c}{H} \left(\sigma_y - VT_\sigma \frac{\partial \sigma_y'}{\partial y} - \left(\sigma_y - VT_\sigma \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} - \frac{1}{2} \zeta V^2 \right) e^{-\frac{t}{T_\sigma}} \right). \end{cases} \quad (3.17)$$

Підставляючи в (3.17) вирази (3.9) і приймаючи $t \rightarrow \infty$ значення абсолютного зносу має вид:

$$\begin{aligned} I_{v0}|_{t \rightarrow \infty} = & \frac{c}{H} \left(\frac{1}{2} \zeta V^2 - VT_\sigma \times \right. \\ & \left. \times \left(\Omega \lambda_1 \lambda_2^2 C + \Omega \left[\frac{b_1(b_1 a_{03} + b_1 b_2 - b_2^2 \xi_0) - a_{30}(1 + 2b_1 b_2) b_2}{1 + 2b_1 b_2} + b_1 - b_2 \xi_0 \right] \right) \right). \end{aligned} \quad (3.18)$$

Враховуючи отримані значення абсолютного зносу рівняння поверхні леза лапи представляється у вигляді:

$$F(x, y - I_{v0}(t)) = 0. \quad (3.19)$$

або для значень постійних $L=D = 10^{-2}$ м, $T_{\sigma M} = T_{\varepsilon M} = 3333$ с, $c = 2,8 \cdot 10^{-5}$, $H = 241000000$ Па, $\eta = 1,5$:

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

$$X(x; y) = x + x \cdot \cos \theta(x; y) - y \cdot \sin \theta(x; y),$$

$$\theta(x; y) = 90^\circ + \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \operatorname{arctg} \left[\frac{0,99979 - 3,28983x + 1,19443y}{-0,36089 + 35,0009x + 12,70748y} \right],$$

$$\begin{aligned} &\text{При } X(x; y) \in [2n \cdot 10^{-3}; (2n+1) \cdot 10^{-3}] n \in Z \Rightarrow \\ &\Rightarrow 0,00617137 + x + 0,36307 y = \\ &= 0,00610929 e^{-0,0003t} + 0,0000248411 e^{-0,588952 e^{-0,0003t} - 3,28983x - 35,0009y}, \quad (3.20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{При } X(x; y) \in [(2n+1) \cdot 10^{-3}; (2n+2) \cdot 10^{-3}] n \in Z \Rightarrow \\ &\Rightarrow 0,00413494x + 0,36307 y = \\ &= 0,00407286 e^{-0,0003t} + 0,0000302295 e^{-0,392635 e^{-0,0003t} - 3,28983x - 35,0009y}. \end{aligned}$$

Графічна інтерпретація рівняння (3.20) наведена на рисунку 3.5.

Проведений аналіз показав, що при збільшенні швидкості переміщення лапи культиватора від 0,5 м/с до 2,5 м/с спостерігається зростання абсолютного зносу I_v у межах від 0,0015 м до 0,0021 м.

Для обґрунтування раціональної структури локального зміцнення леза були побудовані залежності швидкості зношування I/t від кута розхилу лапи для різних комбінацій параметрів періодичних ділянок:

- $L = 0,01$ м, $D = 0,01$ м;
- $L = 0,02$ м, $D = 0,01$ м;
- $L = 0,01$ м, $D = 0,005$ м;
- $L = 0,02$ м, $D = 0,005$ м.

Результати цих побудов представлені на рисунку 3.6 і дозволяють оцінити вплив співвідношення довжини L та інтервалу D між локально зміцненими ділянками на швидкість зношування поверхні леза культиваторної лапи.

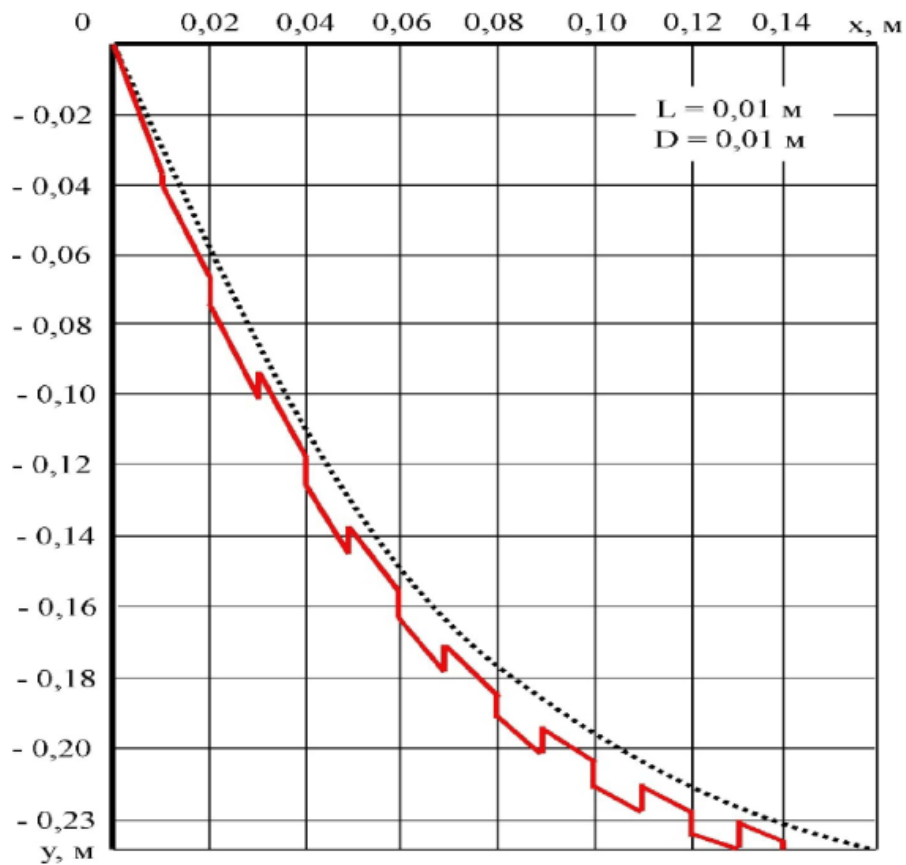


Рис. 3.5. Геометрична форма поверхні локально зміцненого леза лапи культиватора при зношуванні

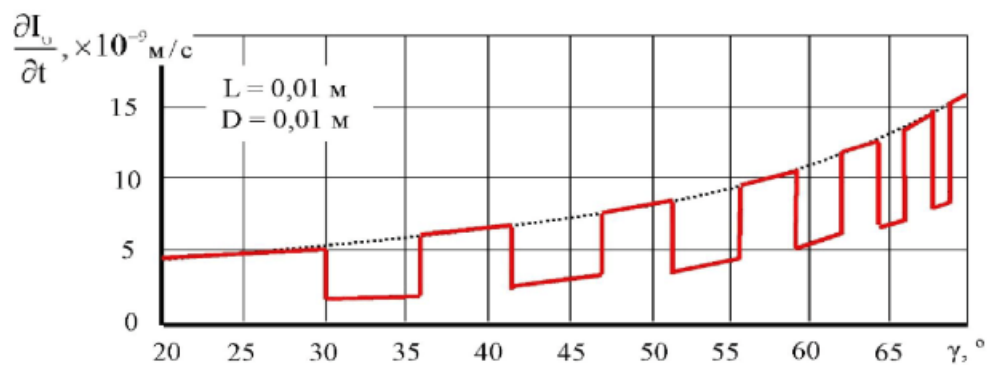


Рис. 3.6. Залежність швидкості зношування від кута розхилу лапи культиватора

Відповідно до умови рівнозношуваності ($\partial I_v / \partial t = \text{const}$) середнє квадратичне відхилення швидкості зношування, яке визначається за формулою

$$\Sigma \left(\frac{\partial I_v}{\partial t} \right) = \sqrt{\int_0^{x_0} \left(\frac{\partial I}{\partial t} (x) \right) \left(x - \int_0^{x_0} x \frac{\partial I_v}{\partial t} (x) dx \right)^2 dx} \quad (3.21)$$

повинно набувати мінімального значення.

Для розглянутих варіантів періодичних ділянок локального зміцнення отримані наступні значення середнього квадратичного відхилення швидкості зношування:

- а) $L = 0,01 \text{ м}, D = 0,01 \text{ м}; \Sigma I/t = 3,2 \cdot 10^{-9} \text{ м/с};$
- б) $L = 0,02 \text{ м}, D = 0,01 \text{ м}; \Sigma I/t = 4,9 \cdot 10^{-9} \text{ м/с};$
- в) $L = 0,01 \text{ м}, D = 0,005 \text{ м}; \Sigma I/t = 5,1 \cdot 10^{-9} \text{ м/с};$
- г) $L = 0,02 \text{ м}, D = 0,005 \text{ м}; \Sigma I/t = 4,3 \cdot 10^{-9} \text{ м/с}.$

Аналіз отриманих результатів показав, що мінімальне середнє квадратичне відхилення спостерігається для першого варіанту і складає $\Sigma_a \left(\frac{\partial I_v}{\partial t} \right) = 3,2 \cdot 10^{-9} \text{ м/с}$. Таким чином, раціональними параметрами локального зміцнення леза лапи культиватора є: $L = 0,01 \text{ м}, D = 0,01 \text{ м}$.

3.2. Програма експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження виконувалися з метою перевірки достовірності математичної моделі процесу зношування леза лапи культиватора із періодичними ділянками локального зміцнення та визначення оптимальних конструктивно-режимних параметрів.

Комплекс експериментальних робіт передбачав таку послідовність:

1. Лабораторне дослідження зношування зразків монометалевого та локально зміцненого леза на круговому стенді для визначення величини і характеру зносу, а також оптимальних параметрів локального зміцнення;
2. Вивчення динаміки зношування криволінійного локально зміцненого леза лапи культиватора у стендових умовах;

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

3. Аналіз впливу форми локально зміцненого леза та режимів роботи на тертя порівняно з серійною стрілкою лапою культиватора;

4. Польові випробування розроблених робочих органів культиватора із встановленням кореляцій між параметрами локального зміцнення та інтенсивністю зношування лап.

Дослідження зношування зразків різальних елементів лап культиваторів здійснювалися на спеціально розробленому круговому стенді, який імітує експлуатаційні умови зношування робочих органів у полі (рис. 3.7, 3.8), із застосуванням запропонованої методики вимірювання величини зносу залежно від напрацювання.



Рис. 3.7. Круговий стенд



Рис. 3.8. Зразок різального елемента леза

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

Наплавлення елементів локального зміцнення на зразки зі сталі 65Г та лапи культиваторів виконувалися із використанням електродів Т-590 на промислового обладнанні. Товщина утвореного локального покриття становила 0,5 мм. Величину лінійного зносу зразків лап культиваторів визначали за допомогою спеціально розробленого пристрою для вимірювання зносу.

Дослідження витрат на тертя лап проводилися з використанням вимірювального комплексу в ґрунтовому каналі (рис. 3.9) та під час експлуатаційних випробувань у польових умовах (рис. 3.10).

Експериментальні випробування були здійснені безпосередньо в умовах господарської діяльності, що дозволило оцінити реальні показники роботи локально зміцнених робочих органів.



Рис. 3.9. Засоби вимірювання витрат на тертя культиваторних лап в ґрунтовому каналі

Обробка та аналіз результатів експериментальних досліджень здійснювалися з використанням математико-статистичних методів та прикладного програмного забезпечення на персональному комп'ютері.

3.3. Результати експериментальних досліджень

Застосування методики планування багатофакторного експерименту з критерієм оптимізації за показником швидкості зношування дозволило отримати рівняння регресії:

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

$$\frac{\partial I_v}{\partial t} = (417,743 + 9,97333D^2 - 93,3D - 3,14LD - 10,575L + 1,32333L^2 - 1,981 + 0,0457333\gamma^2) \cdot 10^{-7},$$

де D – діаметр елемента локального зміцнення, L – крок локального зміцнення, γ – кут розхилу леза.

Графічна інтерпретація залежності (3.22) представлена на рис. 3.11.

За результатами досліджень встановлено оптимальні параметри факторів для мінімальної швидкості зношування леза лапи при шляху тертя $S = 5000$ мта швидкості руху $V = 1,5$ м/с:

- діаметр локального зміцнення $D = 0,0065$ м;
- крок локального зміцнення $L = 0,0117$ м;
- кут розхилу $\gamma = 20^\circ$;
- швидкість зношування $\frac{\partial I_v}{\partial t} = 29,83 \cdot 10^{-7}$ м/с.

Враховуючи, що в рівнянні (3.22) відсутні взаємодії факторів D з γ та L з γ , встановлені значення D і L є оптимальними для будь-якого кута розхилу в досліджуваному інтервалі.

Аналіз графіків (рис. 3.12–3.13) показав, що збільшення шляху тертя та швидкості руху V від 0,5 м/с до 2,5 м/с призводить до лінійного зростання абсолютного зносу локально зміцненого леза. Статистична оцінка за критерієм Фішера показала $F = 1,65 < F_{\text{табл}}(0,05; 12; 14) = 2,53$, що підтверджує кореляційну адекватність отриманих залежностей.

Крім того, при збільшенні кута розхилу γ та швидкості руху лапи середня швидкість зношування поверхні локально зміцненого леза також підвищується ($F = 2,42 < F_{\text{табл}}(0,05; 12; 14) = 2,53$), що підтверджує узгодженість експериментальних результатів

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

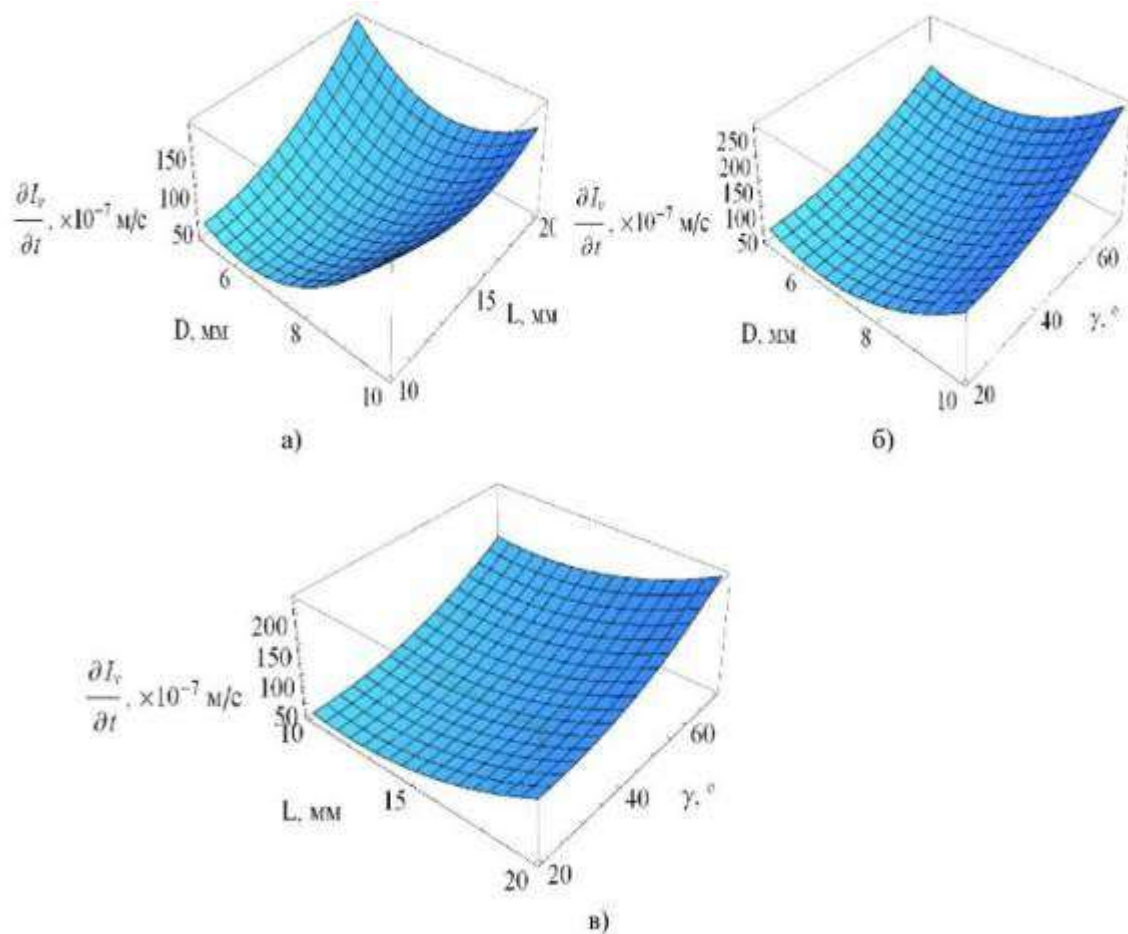


Рис. 3.11. Залежність швидкості зношування локально зміцненого леза лапи культиватора від:

а — діаметра D та кроку L зміцнення при фіксованому куті розхилу $\gamma = 20^\circ$;

б — діаметра D та кута розхилу γ при сталому кроці $L = 0,0117$ м;

в — кроку L та кута розхилу γ при сталому діаметрі $D = 0,0065$ м.

За результатами проведених експериментів побудовано емпіричні залежності втрат на тертя робочих органів від глибини обробітку ґрунту та швидкості руху. Вони представлені у вигляді моделей:

$$R_c = -0,0998 + 0,58V + 0,334h, \quad (3.23)$$

$$R_e = -0,0628 + 0,626V + 0,03032h, \quad (3.24)$$

де R_c та R_e — втрати на тертя відповідно серійної та експериментальної лап;

V — швидкість руху робочого органу;

h — глибина обробітку ґрунту.

Аналіз отриманих моделей дозволяє зробити висновок про лінійну залежність втрат на тертя від швидкості руху та глибини обробітку, що свідчить про доцільність використання локального зміцнення леза для зменшення енерговитрат при експлуатації культиваторних лап.

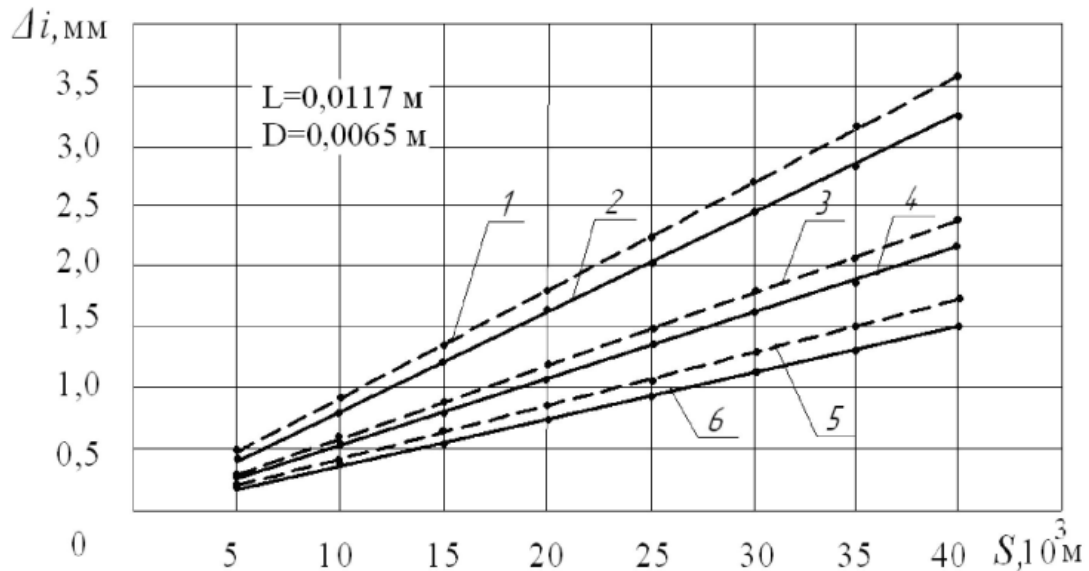


Рис. 3.12. Залежність середнього значення абсолютного зносу Δi поверхні локально зміцненого леза лапи культиватора від шляху тертя S :

1 – $V=2,5$ м/с (теор.); 2 – $V=2,5$ м/с (експ.); 3 – $V=1,5$ м/с (теор.); 4 – $V=1,5$ м/с (експ.); 5 – $V=0,5$ м/с (теор.); 6 – $V=0,5$ м/с (експ.)

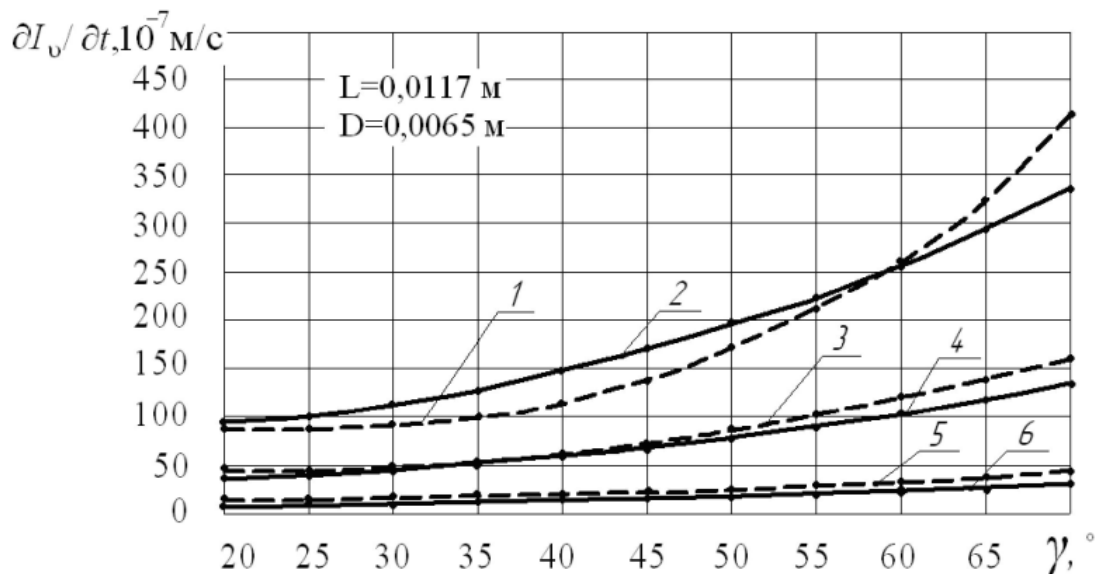
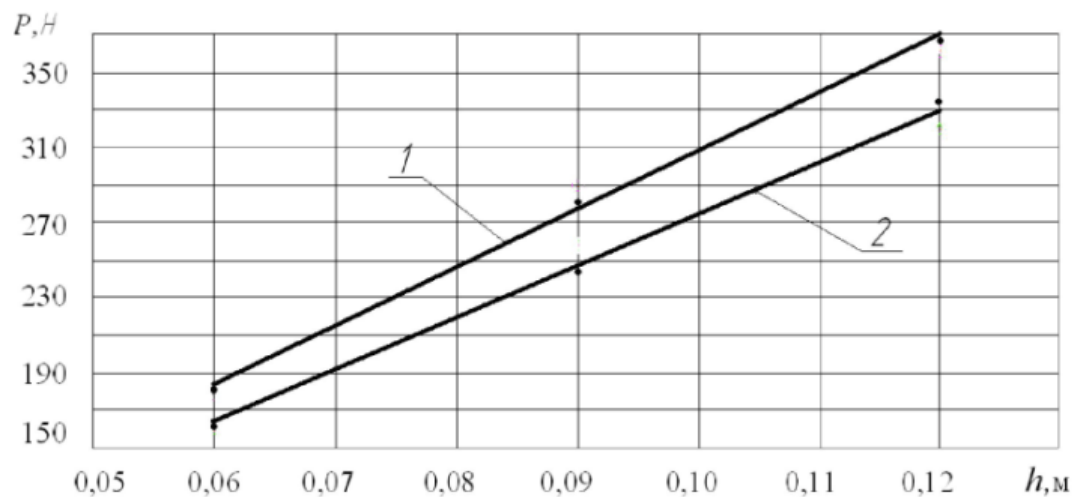


Рис. 3.13. Залежність середнього значення швидкості зношування поверхні локально зміцненого леза лапи культиватора $\partial I_v / \partial t$ від кута розхилу γ :

- 1 — $V = 2,5 \text{ м/с}$ (теоретично);
- 2 — $V = 2,5 \text{ м/с}$ (експериментально);
- 3 — $V = 1,5 \text{ м/с}$ (теоретично);
- 4 — $V = 1,5 \text{ м/с}$ (експериментально);
- 5 — $V = 0,5 \text{ м/с}$ (теоретично);
- 6 — $V = 0,5 \text{ м/с}$ (експериментально).

Аналіз отриманих даних показав, що ключовим фактором, що визначає величину втрат на тертя культиваторних лап, є глибина обробітку ґрунту. Встановлено, що середнє значення втрат на тертя для розробленої локально зміцненої лапи (рис. 3.14, а) при швидкості руху $V = 1,0 \text{ м/с}$ та зміні глибини обробітку в межах $h = 0,06\text{--}0,12 \text{ м}$ є меншим порівняно із серійною лапою на 16,1 %, або в 1,12 рази.

Такий результат підтверджує ефективність застосування локального зміцнення леза для зниження енерговитрат під час виконання робіт із ґрунтом.



а)

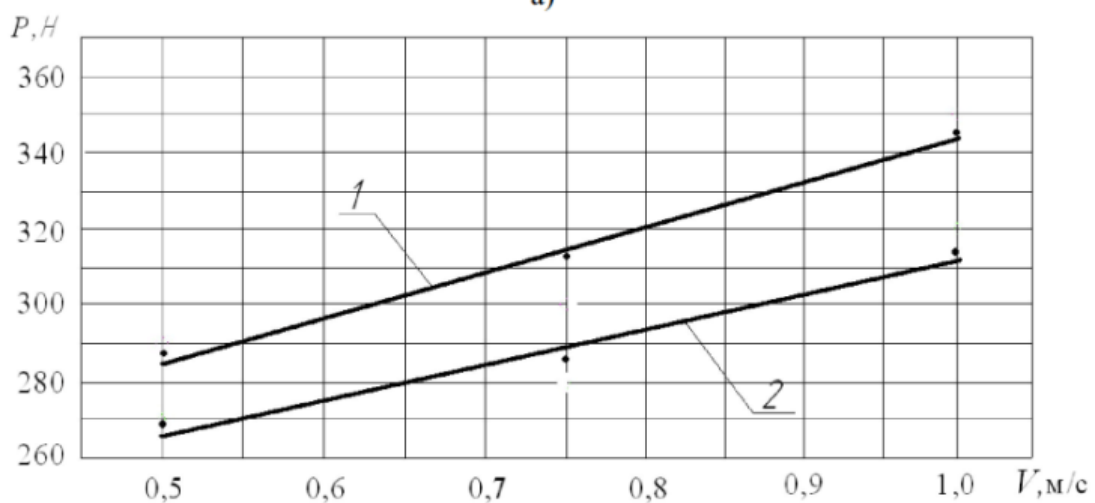


Рис. 3.14. Залежність втрат на тертя культиваторних лап від:

а — глибини обробітку при $V = 1,0$ м/с;

б — швидкості руху при $h = 0,12$ м;

1 — серійна стрілочаста лапа;

2 — експериментальна локально зміцнена лапа.

Аналіз результатів показав, що середні втрати на тертя експериментальної лапи при глибині обробітку $h = 0,12$ м та зміні швидкості руху в діапазоні $V = 0,5$ – $1,0$ м/с зменшуються порівняно із серійною стрілочастою лапою на 9,1 %, або в 1,1 рази (рис. 3.14, б).

Ці дані підтверджують ефективність впровадження локального зміцнення леза у зменшенні енерговитрат робочих органів при виконанні технологічного процесу обробітку ґрунту.

4. РОЗРОБКА КУЛЬТИВАТОРНОЇ ЛАПИ З ЛОКАЛЬНО ЗМІЦНЕНИМ ЛЕЗОМ

4.1. Обґрунтування потреби у розробці

Розробка належить до сфери сільськогосподарського машинобудування і може застосовуватися як робочий орган культиваторів для суцільного та міжрядного обробітку ґрунту. Існуючі конструкції робочих органів культиваторів мають леза, що виконані з двох спряжених криволінійних ділянок та є симетричними. Різальна крайка кожної ділянки оснащена локальним зміцненням нижньої сторони твердосплавним матеріалом у вигляді дисків, розташованих із кроком, що дорівнює їхньому діаметру, а по осі симетрії — на відстані, яка відповідає граничному зносу носка лапи [11]. Таке виконання профілю леза дозволяє збільшити ресурс робочого органу та забезпечує рівномірний знос елементів лапи (носка та крила), що підвищує стійкість до забивання ґрунтом і обволікання рослинністю.

Водночас, недоліком цієї конструкції є виникнення несиметричного зносу унаслідок розташування елементів локального зміцнення. Зношування формує поверхню, вигнуту протилежно напрямку руху, причому кривина зростає при спрацюванні кожного наступного локального елемента, що призводить до підвищення тягового опору.

Для підвищення довговічності та зменшення енергоємності роботи культиваторних лап запропоновано конструкцію з лезами, симетричними між собою, що складаються з двох спряжених криволінійних ділянок. Різальна крайка першої ділянки має локальне зміцнення нижньої сторони твердосплавним матеріалом у вигляді дисків по всій довжині леза, а по осі симетрії стрілкової лапи з верхньої сторони виконане смугове локальне зміцнення від носка на відстань, що відповідає граничному зносу [12]. Виконання такого профілю забезпечує ефект самозагострювання, формування долотоподібного носка лапи та зубчатої поверхні леза, що

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

зменшує тяговий опір та підвищує ефективність рихлення ґрунту і підрізання рослин бур'янів.

Недоліком такої конструкції є різна інтенсивність зношування першої та другої ділянок леза: перша ділянка, що формує носову частину лапи, зазнає більшого зносу через підвищений тиск ґрунтового середовища на верхню поверхню [13].

4.2. Вимоги до конструкції

Основним завданням розробки є підвищення довговічності культиваторних лап при виконанні технологічного процесу обробітку ґрунту.

Запропонована конструкція передбачає, що різальна крайка першої ділянки леза має локальне зміцнення верхньої сторони, а другої — нижньої. По осі симетрії стрілкової лапи з верхньої сторони передбачене смугове локальне зміцнення від носка на відстань, що відповідає граничному зносу.

Таке виконання дозволяє забезпечити рівномірну інтенсивність зношування по всій ріжучій крайці та зберегти геометричні характеристики лапи протягом усього ресурсу.

4.3. Конструкція та принцип роботи лапи з локально зміцненим лезом

Робочий орган культиватора функціонує наступним чином (рис. 4.1). Під час заглиблення лапи в ґрунт на задану глибину тиск ґрунтового середовища найбільший у носовій частині, особливо на верхній поверхні. У зв'язку з цим різальна крайка першої ділянки має локальне зміцнення верхньої сторони, а другої — нижньої. Таке розташування забезпечує вирівнювання динамічного напору ґрунту на різальну крайку леза, навіть при різних кутах розхилу, і сприяє рівномірному зношуванню.

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

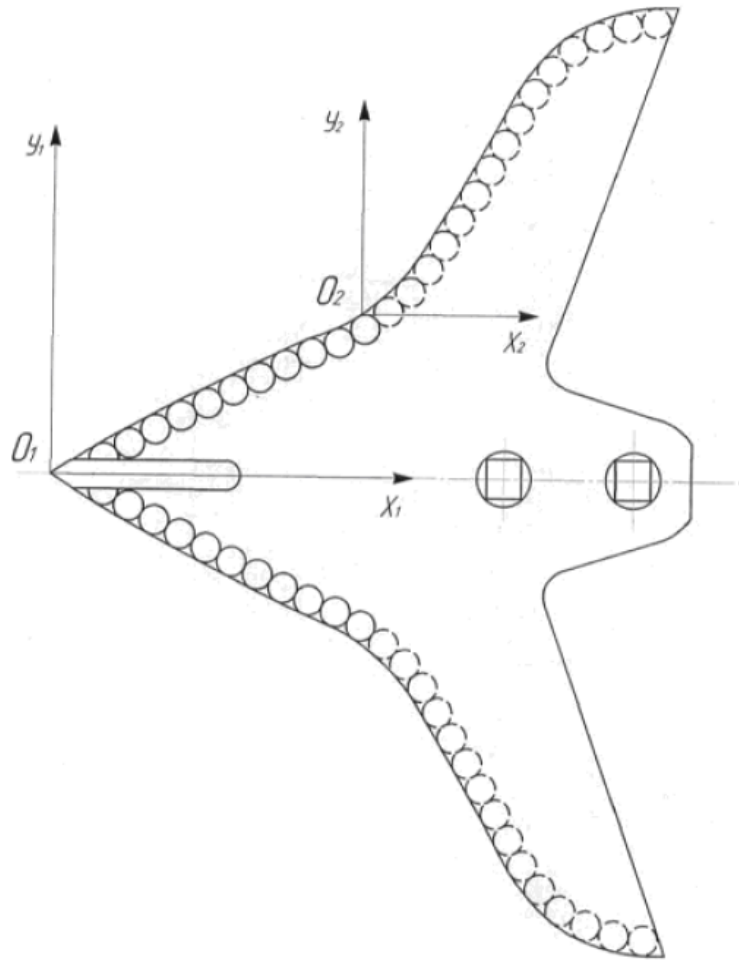


Рис. 4.1. Лапа культиватора з локально зміцненим лезом

При цьому завдяки регульованим швидкостям спрацювання основного та локально зміцненого твердосплавного матеріалу верхньої і нижньої частин крил лапи забезпечується ефект самозагострювання. Внаслідок цього формується зубчаста поверхня з плавним переходом між виступами та впадинами, що вирівнює інтенсивність зношування першої та другої ділянок леза. Такий підхід сприяє рівності обох ділянок, збереженню геометричних характеристик лапи та збільшенню її довговічності.

Процес локального зміцнення здійснюється за допомогою електричної дуги зворотної полярності, яка запалюється між графітовим електродом і поверхнею леза культиваторної лапи. При відносному переміщенні дуги і лапи її стискають потоком інертного газу до щільності потужності 10^3 Вт/см².

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

Палаюча в середовищі інертного газу дуга розплавляє поверхневий шар леза, що сприяє коксуванню шару та надшвидкому гартуванню завдяки високій щільності потужності і швидкому охолодженню теплоотводом у глибину деталі.

Площа нагріву вільної дуги становить 8 мм, а при стисканні інертним газом зменшується до 4 мм, що підвищує щільність потужності до 10^3 Вт/см². Це забезпечує підвищення мікротвердості поверхневого шару на глибину до 1,2 мм, що суттєво покращує зносостійкість леза.

Величина твердості та механічної міцності зони впливу електричної дуги визначається формуванням мікроструктури поверхні. Твердість обробленої сталі безпосередньо залежить від ступеня насичення вуглецем поверхневого шару. У процесі зміцнення метал насичується вуглецем до 0,6 %, внаслідок чого утворюється структура мартенситу з підвищеною твердістю.

На рисунку 4.2 представлена схема локального зміцнення леза культиваторної лапи.

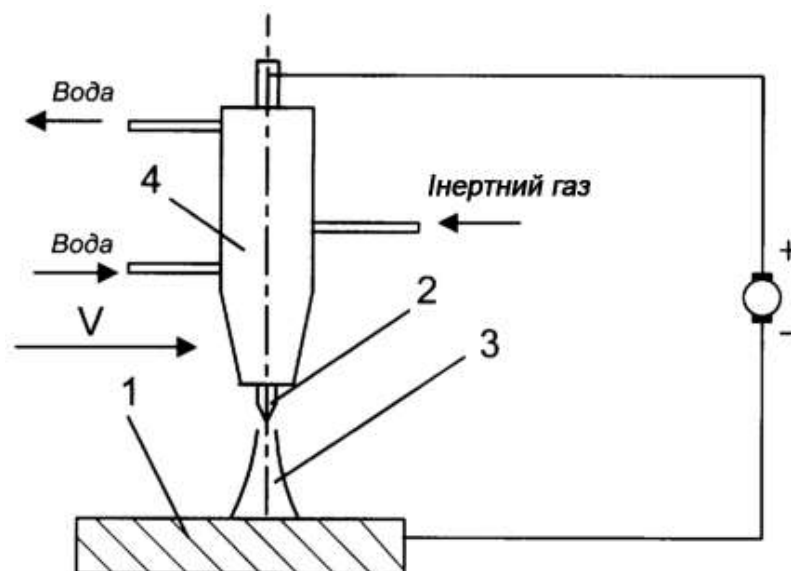


Рис. 4.2. Схема зміцнення леза лапи культиватора

Між лезом лапи культиватора (поз. 1) та вугільним електродом (поз. 2) формується електрична дуга (поз. 3) у середовищі інертного газу, що

подається через сопло (поз. 4). Електрод переміщується відносно деталі зі швидкістю V та охолоджується водою.

Процес обробки електричною дугою, що виникає між графітовим електродом та поверхнею елемента з маловуглецевої сталі марки 20, здійснювався за наступних технологічних параметрів: сила струму дуги — 130 А, напруга — 40 В, відстань між електродом і зразком — 8 мм, відносна швидкість переміщення деталі та електрода — 0,03 м/с, витрата інертного газу — 0,2 м³/год.

Пляма нагріву при стисканні дуги аргоном становила 4 мм, що забезпечувало щільність потужності 103 Вт/см². У результаті обробки утворювався поверхневий шар глибиною 1,2 мм із твердою структурою, твердість якої досягала 60 HRC.

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз існуючих методів та моделей підвищення зносостійкості лап культиваторів дозволив визначити, що процеси зношування можуть бути ефективно керовані шляхом застосування раціонально спроектованої форми леза та оптимізованих параметрів його локального зміцнення. Такий підхід забезпечує контроль над швидкістю та характером зношування під час взаємодії леза з абразивним ґрунтовим середовищем.
2. Теоретичні дослідження, спрямовані на мінімізацію швидкості зношування лапи культиватора та забезпечення рівномірних деформацій у всіх напрямках, показали істотний вплив фізико-механічних і реологічних властивостей ґрунту на форму поверхні леза. Зокрема, значення вологості, щільності, коефіцієнта бокового тиску та швидкості переміщення лапи визначають геометричні параметри робочого органу.
3. Математичне моделювання взаємодії лапи з ґрунтом дозволило отримати функціональну залежність зношування леза від кута розхилу γ , враховуючи умову мінімізації нормальних напружень σ_γ у ґрунтовому середовищі. Отримана модель відображає вплив характеристик ґрунту та швидкості руху на оптимальну форму робочого органу.
4. Дослідження формоутворення поверхні локально зміцненого леза лапи дозволило встановити динаміку її зношування. З'ясовано, що теоретична геометрична форма леза під час зношування проявляє кусочно-періодичний характер, причому збільшення швидкості руху лапи призводить до зростання абсолютного значення зносу.
5. Експериментальні дослідження підтвердили, що найбільш суттєвим фактором, що визначає величину втрат на тертя робочих органів культиватора, є глибина обробітку ґрунту, що обумовлює необхідність врахування цього параметра при оптимізації конструкції леза та режимів його експлуатації.

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тулаганова Л. Ш., Юнушузаєва С. Х., Джураєва Г. Р. Дослідження зносостійкості самозагострювальних лез лап культиватора / Л. Ш. Тулаганова, С. Х. Юнушузаєва, Г. Р. Джураєва // Вісник Ташкентського технічного університету. — 2024. — № 4. — С. 45–52.
2. Ставінський А. В., Вахоніна Л. В., Мартиненко В. В., Руденко А. В. Використання зміцнення поверхні для підвищення зносостійкості робочих органів сільськогосподарських машин / А. В. Ставінський, Л. В. Вахоніна, В. В. Мартиненко, А. В. Руденко // Чорноморський аграрний науковий вісник. — 2024. — Т. 28, № 2. — С. 21–32.
3. Іргашве А., Тулаганова Л. Ш. Динаміка зношування самозагострювальних лез лап культиватора / А. Іргашве, Л. Ш. Тулаганова // Біоконференція: Сільськогосподарська інженерія та сталий розвиток. — 2024. — С. 1–6.
4. Сагдолдіна З. М., Сагдолдіна Г. М., Сагдолдіна А. М. Підвищення зносостійкості плугів шляхом індукційного наплавлення / З. М. Сагдолдіна, Г. М. Сагдолдіна, А. М. Сагдолдіна // Вісник аграрної науки. — 2024. — № 12. — С. 1529.
5. Кан А. С., Сагдолдіна З. М. Покращення зносостійкості лап культиваторів шляхом наплавлення з використанням матеріалу «Сормайт-1» / А. С. Кан, З. М. Сагдолдіна // Сільськогосподарська техніка та технології. — 2024. — № 6. — С. 45–50.
6. Бірюков В. О., Іванов І. П., Петров С. М. Підвищення зносостійкості сільськогосподарських машин за допомогою лазерного зміцнення / В. О. Бірюков, І. П. Іванов, С. М. Петров // Енергетика та машинобудування. — 2024. — № 5. — С. 50–55.

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк. 78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7. Шевченко О. В., Ковальчук І. М. Технології відновлення робочих органів сільськогосподарських машин / О. В. Шевченко, І. М. Ковальчук // Вісник аграрної науки. — 2023. — № 11. — С. 112–118.
8. Петров С. М., Коваленко В. І. Використання твёрдосплавних покриттів для підвищення зносостійкості лап культиваторів / С. М. Петров, В. І. Коваленко // Техніка та технології аграрного виробництва. — 2023. — № 10. — С. 78–83.
9. Іванов І. П., Шевченко О. В. Вплив технології наплавлення на зносостійкість робочих органів сільськогосподарських машин / І. П. Іванов, О. В. Шевченко // Сільськогосподарська техніка. — 2023. — № 9. — С. 65–70.
10. Мартиненко В. В., Руденко А. В. Аналіз ефективності застосування твёрдосплавних покриттів для підвищення зносостійкості лап культиваторів / В. В. Мартиненко, А. В. Руденко // Вісник аграрної науки. — 2023. — № 8. — С. 34–39.
11. Kang, A. S. Improving wear resistance via hardfacing of cultivator shovel / A. S. Kang // Procedia Engineering. — 2017. — Vol. 174. — P. 1164–1171.
12. Sagdoldina, Z., Sagdoldina, G., Sagdoldina, A. Increasing wear resistance of ploughshares by induction cladding / Z. Sagdoldina, G. Sagdoldina, A. Sagdoldina // Materials. — 2024. — Vol. 14, No. 12. — P. 1529.
13. Tulaganova, L., Yunushuzayeva, S., Juraeva, G. Improving the wear resistance and durability of cultivator tools / L. Tulaganova, S. Yunushuzayeva, G. Juraeva // Journal of Physics: Conference Series. — 2022. — Vol. 2373. — P. 022026.
14. Malvajerdi, A. S., et al. Wear and coating of tillage tools: A review / A. S. Malvajerdi, et al. // Journal of Materials Research and Technology. — 2023. — Vol. 19. — P. 1234–1245.

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк. 79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

15. Son, W. C., et al. Microstructure and wear resistance of Fe-Cr-C-Mo-V-Ti-N hardfacing layers / W. C. Son, et al. // Journal of Materials Science & Technology. — 2021. — Vol. 67. — P. 45–55.
16. Owskiak, Z. Wear of spring tine cultivator points in sandy loam and light soils / Z. Owskiak // Soil & Tillage Research. — 1999. — Vol. 50, No. 3–4. — P. 263–270.
17. Biryukov, V., et al. Increasing wear resistance of agricultural machinery parts by laser surfacing / V. Biryukov, et al. // E3S Web of Conferences. — 2024. — Vol. 122. — P. 05020.
18. Irgashve, A., Tulaganova, L. Wear resistance of self-sharpening blades of the tillage cultivator pointed tines / A. Irgashve, L. Tulaganova // BIO Web of Conferences. — 2024. — Vol. 24. — P. 01008.
19. Venturi, F., Hussain, T. Radial injection in suspension high velocity oxy fuel (S-HVOF) thermal spray of graphene nanoplatelets for tribology / F. Venturi, T. Hussain // Surface and Coatings Technology. — 2019. — Vol. 366. — P. 1–9.
20. Tapaszto, O., et al. Highly wear-resistant and low-friction Si₃N₄ composites by addition of graphene nanoplatelets approaching the 2D limit / O. Tapaszto, et al. // Journal of Materials Science. — 2017. — Vol. 52, No. 1. — P. 1–9.

					КРММТВА 25. 24353. 000 ПЗ	Арк. 80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		